



دانشگاه صنعتی شریف

مرکز تحقیقات سنجش از دور (RSRC)



ستاد احیاء دریاچه ارومیه

برآورد تبخیر و تعرق، مصارف و میزان آب قابل صرفه جویی محدوده‌های کشاورزی حوضه آبریز دریاچه ارومیه در سال ۲۰۱۰ میلادی

مدیر فنی طرح

دکتر سمیه سیما

تهیه کنندگان

پیمان صائمان

محمد فریدزاد

سهیلا یونس زاده جلیلی

مریم عمادزاده

احسان جلیوند

حمید فرهمند

مرسده طاهری

اردیبهشت ۱۳۹۴



شناسه سند		
برآورد تبخیر و تعرق، مصارف و میزان آب قابل صرفه جویی محدوده های کشاورزی حوضه آبریز دریاچه ارومیه در سال ۲۰۱۰ میلادی		عنوان سند
<input type="checkbox"/> پروپوزال	<input type="checkbox"/> گزارش پیشرفت	نوع سند
<input type="checkbox"/> مقاله	<input type="checkbox"/> خلاصه مدیریتی	
		کد سند
		شماره قرارداد
		تاریخ قرارداد
		کارفرما
		گروه فنی
		مدیر فنی طرح
		داوران داخلی
		کارشناسان فنی
		طرح
		تاریخ انتشار
		ویرایش

چکیده

برآورد تغییرات مصرف آب بخش کشاورزی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه با توجه به کاهش چشمگیر سطح دریاچه در سال های اخیر از اهمیت بالایی برخوردار است. در این مطالعه با استفاده از الگوریتم SEBAL که با توجه به اثر شیب، ارتفاع و جهت شیب (Aspect) اصلاح شده و تصاویر ماهواره ای سنجنده MODIS، نرخ تبخیر و تعرق واقعی حوضه آبریز دریاچه ارومیه طی هفت ماه میلادی آوریل تا اکتبر سال ۲۰۱۰ میلادی (نیمه دوم فروردین تا نیمه اول آبان ۱۳۸۹) برآورد شده است.

الگوی مکانی تبخیر- تعرق نشانگر آن است که اراضی کشاورزی واقع در بخش غربی دریاچه ارومیه (دشت ارومیه و شهرهای اطراف آن)، بخش جنوبی دریاچه (پایاب رودخانه های سیمینه رود و زرینه رود) و بخش شرقی حوضه آبریز (سراب)، بیشترین مقادیر ارتفاع تبخیر و تعرق واقعی را نسبت به سایر نقاط حوضه آبریز دریاچه ارومیه دارا می باشند. همچنین بررسی تغییرات زمانی تبخیر و تعرق نشان می دهد که مقادیر ارتفاع تبخیر و تعرق واقعی از ماه آوریل تا ماه جولای افزایش داشته و پس از رسیدن به حداکثر مقدار خود در ماه جولای با شیب ملایم تا پایان ماه اکتبر (آبان ماه) کاهش می یابد.

در انتها با استفاده از مدل توسعه یافته بیلان بخار حوضه، نقشه ارزش نسبی تبخیر و تعرق به تبخیر دریاچه بدست آمده که نتایج این بررسی می تواند به منظور اتخاذ سیاست های کاهش مصرف آب کشاورزی و احیای دریاچه مورد استفاده قرار گیرد. همچنین میزان آب قابل صرفه جویی در ۴ منطقه از اراضی کشاورزی حوضه آبریز دریاچه ارومیه که بیشترین مقدار تبخیر و تعرق را دارا هستند محاسبه شد. بیشترین درصد آب قابل صرفه جویی در این مناطق بدون اعمال سیاست تغییر الگوی کشت یا بهبود سیستم آبیاری، برابر با ۳۹٪ است و به دشت ارومیه تعلق دارد. حجم آب قابل صرفه جویی در دشت ارومیه معادل ۱۹۷ میلیون متر مکعب تخمین زده شد.

کلیدواژه ها: بیلان انرژی، تبخیر و تعرق، صرفه جویی در آبیاری، SEBAL، حوضه دریاچه ارومیه

فهرست

۱- مقدمه	۱
۲- مروری بر ادبیات موضوع	۳
۳- منطقه مورد مطالعه	۶
۴- روش انجام کار	۷
۴-۱- مفاهیم و روابط الگوریتم SEBAL	۸
۴-۱-۱- شار تشعشع خالص در سطح زمین (R_n)	۸
۴-۱-۲- تابش طول موج کوتاه ورودی ($R_{s\downarrow}$)	۹
۴-۱-۳- تابش طول موج بلند خروجی ($R_{L\uparrow}$)	۱۱
۴-۱-۴- تابش طول موج بلند ورودی ($R_{L\downarrow}$)	۱۲
۴-۱-۵- شار گرمایی زمین (G)	۱۳
۴-۱-۶- شار حرارتی محسوس (H)	۱۳
۴-۲- تخمین نرخ تبخیر و تعرق واقعی	۲۲
۴-۲-۱- نرخ تبخیر و تعرق لحظهای (ET_{inst})	۲۲
۴-۲-۲- نرخ تبخیر و تعرق واقعی روزانه (ET_{24})	۲۳
۴-۲-۳- نرخ تبخیر و تعرق واقعی فصلی ($ET_{seasonal}$)	۲۳
۴-۳- محاسبات نقشه های بارش	۲۳
۴-۴- محاسبه میزان آب قابل صرفه جویی در اراضی کشاورزی	۲۴
۴-۵- داده های مورد استفاده در الگوریتم بیلان انرژی	۲۶
۴-۵-۱- داده های زمینی	۲۶
۴-۵-۲- داده های ایستگاهی جهت محاسبات بارش	۲۷
۴-۵-۳- داده های ماهواره ای	۲۸
۴-۶- برآورد نیاز خالص آبیاری و آبیاری اعمال شده محصولات زراعی-باغی در اراضی آبی	۳۰
۴-۷- بیلان بخار حوضه آبریز	۳۱
۴-۸- ارزیابی عملکرد مدل SEBAL	۳۱

۳۲	۵- نتایج
۳۳	۵-۱- تحلیل تغییرات زمانی-مکانی شارهای انرژی
۳۶	۵-۲- تبخیر و تعرق مرجع
۳۷	۵-۲-۱- دمای هوا
۳۸	۵-۲-۲- سرعت باد
۳۹	۵-۲-۳- درصد رطوبت
۳۹	۵-۲-۴- ساعات آفتابی
۴۰	۵-۳- نرخ تبخیر و تعرق واقعی روزانه
۴۵	۵-۴- نرخ تبخیر و تعرق واقعی ماهانه
۴۷	۵-۵- مقایسه نقشه تبخیر و تعرق واقعی حوضه آبریز دریاچه ارومیه با نقشه کاربری اراضی
۴۸	۵-۶- مقایسه مقادیر برآورد شده با داده های زمینی
۵۱	۵-۷- برآورد نیاز آبی محصولات در اراضی آبی
۵۳	۵-۸- بیلان بخار حوضه آبریز
۵۴	۵-۹- حجم آب قابل صرفه جویی در مناطق عمده زراعی حوضه آبریز ارومیه در سال ۲۰۱۰
۵۶	۵-۹-۱- دشت میان دو آب
۵۹	۵-۹-۲- منطقه زراعی سراب
۶۰	۵-۹-۳- دشت ارومیه
۶۲	۵-۹-۴- منطقه زراعی نقده و اشنویه
۶۴	۵-۱۰- جمع بندی میزان پتانسیل آب قابل صرفه جویی در مناطق مختلف حوضه آبریز دریاچه ارومیه
۶۵	۶- نتیجه گیری و جمع بندی
۶۹	۷- فهرست مراجع

فهرست شکل ها

- شکل ۱- تغییرات سطح تراز دریاچه ارومیه از سال ۱۳۴۴ تا ۱۳۸۹ (سازمان حفاظت محیط زیست، ۱۳۸۹)..... ۱
- شکل ۲- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه (حوضه آبریز دریاچه ارومیه)..... ۷
- شکل ۳- مراحل انجام مطالعه ۷
- شکل ۴- شماتیک بیلان انرژی در سطح زمین (ALLEN ET AL. 2002) ۸
- شکل ۵- دیاگرام محاسبه شار حرارتی محسوس (ALLEN ET AL. 2002) ۱۶
- شکل ۶- مشخصات گیاه مرجع به صورت شماتیک (ASCE-EWRI 2005) ۲۰
- شکل ۷- اسامی و موقعیت ایستگاه های سینوپتیک استان های آذربایجان شرقی و غربی مورد استفاده برای محاسبات بارش ۲۷
- شکل ۸- پراکنندگی ایستگاه های باران سنجی وزارت نیرو در سطح حوضه آبریز دریاچه ارومیه ۲۸
- شکل ۹- تصویر شماتیک بیلان آب یک حوضه آبریز به همراه دریاچه ۳۱
- شکل ۱۰- میزان شارهای انرژی تجمعی هفت ماه مورد مطالعه حوضه آبریز دریاچه ارومیه در سال ۲۰۱۰
($W.M^{-2}$) ۳۳
- شکل ۱۱- تغییرات میانگین شار تشعشع خالص لحظه ای در روزهای مورد محاسبه طی هفت ماه مورد مطالعه حوضه آبریز دریاچه ارومیه در سال ۲۰۱۰ ($W.M^{-2}$) ۳۴
- شکل ۱۲- تغییرات میانگین شار حرارتی محسوس لحظه ای در روزهای مورد محاسبه طی هفت ماه مورد مطالعه حوضه آبریز دریاچه ارومیه در سال ۲۰۱۰ ($W.M^{-2}$) ۳۵
- شکل ۱۳- تغییرات میانگین شار گرمای زمین لحظه ای در روزهای مورد محاسبه طی هفت ماه مورد مطالعه حوضه آبریز دریاچه ارومیه در سال ۲۰۱۰ ($W.M^{-2}$) ۳۶
- شکل ۱۴- تغییرات زمانی تبخیر و تعرق مرجع با استفاده از داده های ایستگاه ارومیه در حوضه آبریز دریاچه ارومیه در سال میلادی ۲۰۱۰ (میلی متر) ۳۷
- شکل ۱۵- تغییرات بیشینه، کمینه و متوسط دمای هوا در محل ایستگاه ارومیه ۳۸
- شکل ۱۶- تغییرات متوسط روزانه سرعت باد در محل ایستگاه ارومیه ۳۸
- شکل ۱۷- تغییرات متوسط روزانه درصد رطوبت در ایستگاه ارومیه ۳۹

- شکل ۱۸- تغییرات تعداد ساعات آفتابی در روز در سال ۲۰۱۰ میلادی در محل ایستگاه ارومیه ۴۰
- شکل ۱۹- تغییرات تبخیر و تعرق مرجع ۲۰۱۰ محاسبه شده برای ایستگاه ارومیه بر حسب میلی متر (میانگین ماهانه و روز مورد محاسبه) ۴۱
- شکل ۲۰- توزیع مکانی تبخیر و تعرق واقعی روزانه در حوضه دریاچه ارومیه در تاریخ های تصاویر دریافتی در سال ۲۰۱۰ میلادی (MM. DAY-1) ۴۲
- شکل ۲۱- تغییرات زمانی میانگین نرخ تبخیر و تعرق واقعی اراضی کشاورزی حوضه آبریز دریاچه ارومیه هفت ماه آوریل تا اکتبر در سال ۲۰۱۰ میلادی (میلی متر) ۴۶
- شکل ۲۲- تغییرات تبخیر و تعرق مرجع در محل ایستگاه ارومیه ۴۷
- شکل ۲۳- الف: نقشه توزیع مکانی اراضی کشت آبی و باغی حوضه آبریز دریاچه ارومیه در سال میلادی ۲۰۱۰ (مرکز تحقیقات سنجش از دور دانشگاه صنعتی شریف) ب: نقشه تجمعی نرخ تبخیر و تعرق واقعی حوضه آبریز دریاچه ارومیه در سال میلادی ۲۰۱۰ ۴۹
- شکل ۲۴- نمودار مقایسه نتایج نرخ تبخیر و تعرق واقعی و اعداد ایستگاه لایسیمتری تبریز در سال میلادی ۲۰۱۰ ۵۰
- شکل ۲۵- نرخ ماهانه تبخیر و تعرق مرجع در سال ۲۰۱۰ میلادی (میلی متر) ۵۲
- شکل ۲۶- تغییرات زمانی میانگین نرخ تبخیر و تعرق واقعی اراضی کشاورزی حوضه آبریز دریاچه ارومیه هفت ماه آوریل تا اکتبر در سال ۲۰۱۰ (میلی متر) ۵۲
- شکل ۲۷- تغییرات زمانی بارش مؤثر میانگین ماهانه اراضی زراعی باغی حوضه آبریز دریاچه ارومیه در سال ۲۰۱۰ (میلی متر) ۵۳
- شکل ۲۸- بیلان بخار حوضه آبریز دریاچه ارومیه طی هفت ماه از ماه میلادی آوریل تا اکتبر ۲۰۱۰ ۵۴
- شکل ۲۹- نقشه نرخ تبخیر و تعرق واقعی و تفکیک مناطق عمده زراعی و باغی حوضه آبریز دریاچه ارومیه ۵۶

فهرست جدول ها

- جدول ۱- مقادیر ثابت C_D و C_N جهت محاسبه تبخیر و تعرق مرجع (ASCE-EWRI 2005) ۱۸
- جدول ۲- داده های اولیه مورد استفاده در الگوریتم بیلان انرژی به همراه تفکیک مکانی و زمانی داده ها ۲۹
- جدول ۳- شرایط لازم برای استفاده از هر محصول در الگوریتم اصلاح شده SEBAL ۳۰
- جدول ۴- تعداد روزهای با کیفیت مناسب در فاصله ماه های مختلف سال ۲۰۱۰ ۳۰
- جدول ۵- شاخص های عملکرد برای بررسی عملکرد الگوریتم مورد مطالعه ۳۲
- جدول ۶- تاریخ روز مورد مطالعه در هر ماه مورد بررسی در سال ۲۰۱۰ جهت محاسبه ارتفاع تبخیر و تعرق واقعی حوضه ۴۰
- جدول ۷- مقایسه مقادیر ثبت شده ارتفاع تبخیر و تعرق واقعی در ایستگاه لایسیمتر تبریز و مقادیر تخمین زده شده توسط الگوریتم SEBAL اصلاح شده با اثر شیب و جهت شیب در سال ۲۰۱۰ ۵۰
- جدول ۸- سطح زیر کشت و نیاز آبی در محدوده دشت میاندوآب ۵۷
- جدول ۹- سطح زیر کشت و نیاز آبی در محدوده شهرستان سراب ۶۰
- جدول ۱۰- سطح زیر کشت و نیاز آبی در محدوده دشت ارومیه ۶۱
- جدول ۱۱- سطح زیر کشت و نیاز آبی در محدوده شهرستان های نقده و اشنویه ۶۳
- جدول ۱۲- خلاصه نتایج محاسبات صرفه جویی در حوضه ارومیه ۶۴

فهرست علائم

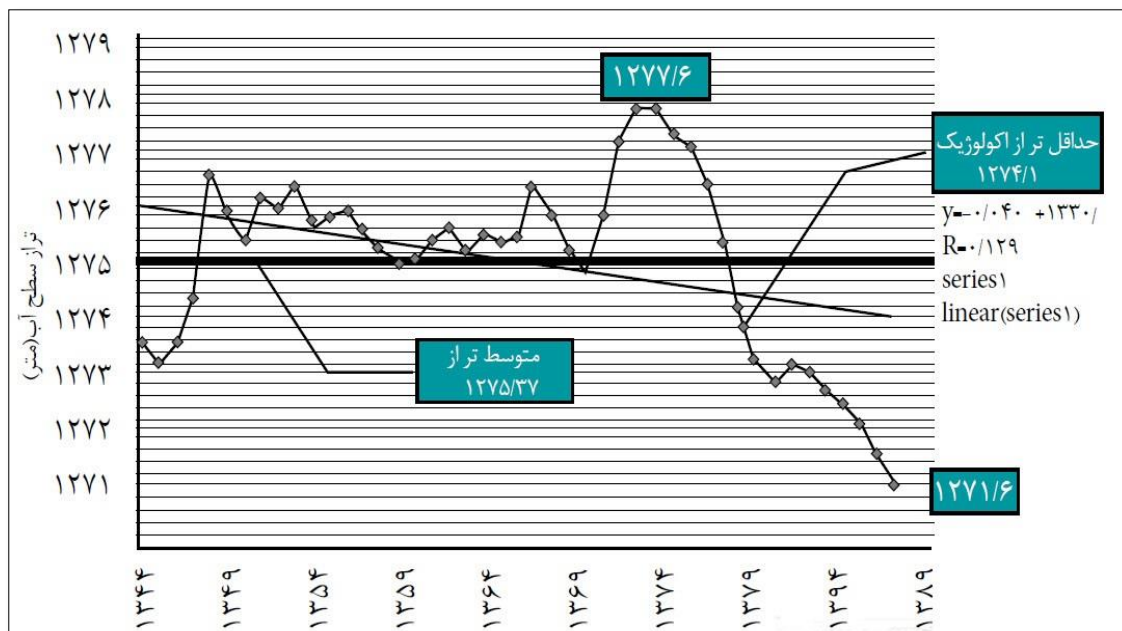
c_p	air specific heat	J/kg/K
d	zero plane displacement	m
d_{e-s}	relative earth-sun distance	-
d_r	inverse squared relative earth-sun distance	-
ET	actual evapotranspiration rate	mm/hr
ET_r	reference evapotranspiration	mm/hr
G	soil heat flux	W/m^2
H	sensible heat flux	W/m^2
k	von Karman's constant	0.41
L	Monin-Obukhov length	m
L_λ	spectral radiance for band λ	$W/m^2 /sr/\mu m$
r_{ah}	aerodynamic resistance to heat transport	s/m
R_n	net radiation flux	W/m^2
$\downarrow SR$	incoming shortwave radiation	W/m^2
$\downarrow LR$	incoming longwave radiation	W/m^2
$\uparrow LR$	outgoing longwave radiation	W/m^2
R_c	corrected thermal radiance from the surface	$W/m^2 /sr/\mu m$
R_p	path radiance in the 10.4 – 12.5 μm band	$W/m^2 /sr/\mu m$
R_{sky}	narrow band downward thermal radiation for a clear sky	$W/m^2 /sr/\mu m$
T_a	near surface air temperature	K
T_s	surface temperature	K
u	wind velocity	m/s
u_*	friction velocity	m/s
z	Height	m
z_{om}	momentum roughness length	m
α	surface albedo	-
$\alpha_{path-radiance}$	albedo path radiance	-
α_{toa}	albedo at top of atmosphere	-
β	solar elevation angle	degrees
γ	aspect angle of the pixel	radians
δ	declination of the earth	radians
ϵ_0	broad band surface emissivity	-
ϵ_{NB}	narrow band surface emissivity	-
ϵ_a	atmospheric emissivity	-
θ	solar incidence angle	degrees
λ	latent heat of vaporization	J/kg
λET	latent heat flux	W/m^2

ρ	air density	kg/m^3
ρ_λ	reflectivity for band λ	-
σ	Stefan-Boltzmann constant	$5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2/\text{K}^4$
τ_{sw}	shortwave transmissivity of air	-
τ_{NB}	narrow band transmissivity of air	-
ϕ	latitude of the pixel	radians
Ψ_h	stability correction for heat transport	-
Ψ_m	stability correction for momentum transport	-
ω	mountain wind speed weighting coefficient	-
ω_λ	weighting coefficient for band λ	-

۱- مقدمه

دریاچه ارومیه به عنوان بزرگ ترین دریاچه داخلی ایران و دومین دریاچه آب شور دنیا از اهمیت زیادی برای پایداری زیست محیطی منطقه برخوردار است. آب این دریاچه بسیار شور بوده و عمدتاً از رودخانه های زرینه رود، سیمینه رود، تلخه رود، گذار، باراندوز، شهرچای، نازلو و زولا تغذیه می شود. مساحت حوضه آبریز دریاچه ارومیه ۵۱۸۷۶ کیلومتر مربع است (Delju et al. 2013). این حوضه با داشتن دشت هایی مانند دشت تبریز، ارومیه، مراغه، مهاباد، میاندوآب، نقده، سلماس، پیرانشهر، آذرشهر و اشنویه، یکی از کانون های ارزشمند فعالیت کشاورزی و دامداری در ایران به شمار می رود.

این دریاچه در طی سال های اخیر در خطر خشک شدن کامل قرار گرفته و طی سال های ۱۳۷۴ تا ۱۳۹۰، ۷ متر کاهش تراز آب داشته است (شکل ۱). کاهش رواناب های ورودی به دریاچه در اثر ساخت سدهای متعدد در مسیر رودخانه های ورودی به دریاچه، افزایش مصرف در بخش کشاورزی، افزایش تبخیر، کاهش بارندگی در پی تغییرات اقلیمی و برداشت غیرمجاز از آب های زیرزمینی، از عوامل انسانی و غیرانسانی خشک شدن این دریاچه به شمار می آیند.



شکل ۱- تغییرات سطح تراز دریاچه ارومیه از سال ۱۳۴۴ تا ۱۳۸۹ (سازمان حفاظت محیط زیست، ۱۳۸۹)

- با توجه به آنکه کارشناسان، افزایش مصارف کشاورزی را به عنوان مهم ترین عامل مؤثر در کاهش تراز دریاچه دانسته اند و آمارهای متفاوت و ناهماهنگ از میزان مصرف آب در بخش کشاورزی گزارش شده است، هدف از انجام این مطالعه تلاش برای پاسخ به سؤالات زیر است:
۱. یکی از ترم های مهم و مجهول در تعیین میزان مصارف حوضه آبریز دریاچه ارومیه، مقدار تبخیر و تعرق می باشد. بنابراین این سؤال مطرح می شود که آیا امکان استفاده از الگوریتم SEBAL^۱ جهت تخمین تبخیر و تعرق حوضه آبریز دریاچه ارومیه در سال ۲۰۱۰ میلادی با استفاده از داده های زمینی و ماهواره ای وجود دارد و آیا این الگوریتم، دقت مناسب در برآورد را داراست؟
 ۲. در تعیین مقادیر تبخیر و تعرق حوضه دریاچه ارومیه در سال ۲۰۱۰ میلادی با استفاده از روش بیلان انرژی تأثیر هر یک از ترم های بیلان چگونه است؟ کدام ترم بیشترین تأثیر را در برآورد مقادیر تبخیر و تعرق حوضه داراست؟
 ۳. تغییرات ترم های بیلان انرژی طی ماه های مختلف سال چگونه است؟ مقادیر بیشینه و کمینه هر یک در چه ماه هایی از سال رخ می دهند؟
 ۴. توزیع مکانی مقادیر تبخیر و تعرق حوضه دریاچه ارومیه در سال میلادی ۲۰۱۰ میلادی چگونه بوده است؟ نحوه توزیع مکانی تبخیر و تعرق حوضه طی ماه های مختلف چگونه است؟
 ۵. از آنجا که پیش بینی می شود که اراضی کشاورزی (اراضی باغی و زراعی) بیشترین میزان تبخیر و تعرق را دارا باشند آیا نقشه کاربری اراضی حوضه دریاچه ارومیه در سال ۲۰۱۰ میلادی، مطابق با تغییرات مکانی نقشه تبخیر و تعرق می باشد یا خیر؟
 ۶. حجم آب مورد نیاز گیاه جهت آبیاری و آبیاری اعمال شده در اراضی کشاورزی چه مقدار است؟ از آنجا که فناوری سنجش از دور و تکنیک های GIS ابزار مناسبی جهت بررسی تغییرات کمی و کیفی مصرف آب در سال های مختلف را برای تصمیم گیران فراهم می نمایند؛ لذا بدین منظور در این مطالعه با پردازش تصاویر ماهواره ای و با استفاده از الگوریتم بیلان انرژی در سطح زمین (SEBAL)، میزان تبخیر و تعرق واقعی حوضه (ET) در سال ۲۰۱۰ میلادی تخمین زده شده است. تخمین مصرف آب در بخش کشاورزی نتیجه دیگر این مطالعه می باشد.

^۱ Surface Energy Balance Algorithm for Land

۲- مروری بر ادبیات موضوع

روش های مختلفی جهت تخمین تبخیر و تعرق واقعی با استفاده از تصاویر ماهواره ای و داده های زمینی برای مناطق وسیع توسعه داده شده است (Granger 1997; Vidal and Perrier 1989). مدل های تخمین تبخیر و تعرق به دو دسته کلی تک منبعی^۲ (که در آن خاک و گیاه به صورت مجموعه واحد در نظر گرفته می شوند) و دو منبعی^۳ (که در آن خاک و گیاه به صورت اجزای جدا در نظر گرفته می شوند) تقسیم بندی می شوند. در مدل های تک منبعی، تنها از یک مقاومت آئرو دینامیک در فرآیند انتقال آب-گرما استفاده می شود و فرض می شود تمامی سطح زمین، تحت تأثیر دما و رطوبت قرار می گیرد (Huntingford et al. 2000; Nishida et al. 2003)؛ حال آنکه در مدل های دو منبعی، از چندین مقاومت مجزا برای گیاه و خاک استفاده می شود. بنابراین در مناطقی که پوشش گیاهی پراکنده وجود دارد استفاده از مدل های دو منبعی بجای مدل تک منبعی توصیه می شود، زیرا خاک و گیاه به عنوان دو عنصر مجزا در نظر گرفته شده اند (Norman et al. 1995). از روش های دو منبعی مطرح می توان به TSEB^۴ (Kustas and Norman 1999; Norman et al. 1995) و STSEB^۵ (Sánchez et al. 2008) و از روش های معروف تر تک منبعی می توان به SEBAL^۶ (Su et al. 1998; Bastiaanssen 2000; Bastiaanssen et al. 1998) METRIC^۷ (Allen et al. 2007) و SEBS^۸ اشاره کرد.

یکی از روش های تخمین تبخیر و تعرق واقعی، الگوریتم بیان انرژی در سطح زمین (SEBAL) است که توسط Bastiaanssen ارائه شده است (Bastiaanssen 1995). SEBAL یک مدل بر مبنای روابط تجربی و فیزیکی است که ابتدا در مصر و اسپانیا با تصاویر Landsat و برای برآورد تبخیر و تعرق مناطق کشاورزی، تعیین یکنواختی محصول، تنش آبی و مدیریت شبکه های آبیاری بکار گرفته شد و پس از آن به صورت گسترده و در مطالعات مشابه مورد استفاده قرار گرفت (Bastiaanssen et al. 1998). به عنوان مثال،

^۲ Single-Source

^۳ Two-Source

^۴ Two-Source Energy Balance

^۵ Simplified Two-Source Energy Balance

^۶ Surface Energy Balance Algorithm for Land

^۷ Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration

^۸ Surface Energy Balance System

Bastiaanssen و همکاران میزان مصرف آب در شبکه های آبیاری در پاکستان را با استفاده از تصاویر سنجنده AVHRR و این مدل مورد بررسی قرار دادند (Bastiaanssen et al. 1999). Hafeez برای تخمین تبخیر و تعرق واقعی فصلی با استفاده از الگوریتم SEBAL، از تصاویر سنجنده های ASTER، MODIS و Landsat در حوضه Uprilis فلیپین استفاده نمود (Hafeez 2003). در مطالعه دیگری، مقایسه ای بین مقادیر تبخیر و تعرق واقعی به دست آمده از سنجنده های AVHRR و MODIS با داده های زمینی انجام گرفته است. نتایج این تحقیق نشان می دهد که همبستگی نتایج ET به دست آمده از تصاویر MODIS با داده های زمینی بسیار خوب بوده و ضریب همبستگی بالائی (۰/۹۶) را نشان داد، این در حالی است که نتایج ET به دست آمده از تصاویر AVHRR ضریب همبستگی کمتری (۰/۷۷) از خود نشان داده است (Batra et al. 2006).

در مطالعه ای که توسط Hemakumara و همکاران در منطقه ای نسبتاً وسیع با محصولات زراعی مختلف در سریلانکا صورت گرفت، مقایسه نتایج تبخیر و تعرق واقعی محاسبه شده با استفاده از تصاویر NOAA و الگوریتم SEBAL با مقادیر اندازه گیری شده در محل با استفاده از scintillometer، خطایی ۱۷ درصدی را در بازه زمانی ۱۰ روز نشان داد. اما این خطا در محاسبات ماهانه به حدود ۱٪ تقلیل یافت (Hemakumara et al. 2003). در مطالعه ای دیگر که توسط Zwart و Bastiaanssen با استفاده از روش SEBAL و تصاویر سنجنده MODIS در اراضی کشت گندم در مکزیک صورت گرفت، در بازه زمانی ۱۱۰ روز، خطایی حدود ۹٪ در بین مقادیر محاسبه شده توسط این الگوریتم و اندازه گیری های میدانی گزارش شد (Zwart and Bastiaanssen 2007). در مطالعه ای که توسط Du و همکاران در دشت Sanjiang در چین صورت گرفت، با استفاده از ۱۲ تصویر سنجنده MODIS در طول ۱۸۴ روز دوره رشد از ماه می تا انتهای ماه اکتبر و با بهره گیری از مدل SEBAL، میزان اختلاف ET واقعی روزانه و اندازه گیری انجام شده توسط Eddy Covariance به صورت میانگین ۱۰/۵٪ گزارش شد. همچنین نتایج این مطالعه نشان از خطای ۸/۸ درصدی در مقیاس فصلی داشت (Du et al. 2013).

در مطالعه Hong و همکاران، امکان استفاده از الگوریتم SEBAL جهت محاسبه تبخیر و تعرق واقعی با استفاده از تصاویر MODIS مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به نتایج حاصل شده در مطالعه مذکور، به کارگیری الگوریتم SEBAL برای تصاویر MODIS نتایج قابل قبولی جهت تخمین تبخیر و تعرق ارائه می نماید. همچنین در این پژوهش، تبخیر و تعرق با استفاده از الگوریتم SEBAL، یک بار با تصاویر

MODIS و بار دیگر با استفاده از تصاویر Landsat، برای یک منطقه مشابه محاسبه و مورد بررسی قرار گرفت. پس از مقایسه، اختلاف در نتایج نهایی حاصل از محاسبات تبخیر و تعرق با استفاده از دو نوع تصویر ماهواره‌ای، ناچیز ارزیابی گردید (Hong et al. 2009).

در حوضه دریاچه ارومیه نیز مطالعات مختلفی در خصوص تخمین تبخیر و تعرق واقعی در حوضه انجام گرفته است. از جمله، در مطالعه‌ای طی دو سال خشک و تر ۹۴-۱۹۹۳ و ۲۰۰۰-۱۹۹۹ میلادی، تخمین تبخیر و تعرق واقعی در حوضه دریاچه ارومیه در مقیاس سالانه و با استفاده از الگوریتم SEBAL و تصاویر NOAA-AVHRR صورت گرفته است (موسسه تحقیقات آب و DLG، ۱۳۸۵). در مطالعه‌ای دیگر که توسط مؤسسه تحقیقات آب وزارت نیرو انجام شده، تغییر شرایط محیطی و کاربری اراضی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه مورد بررسی قرار گرفته است. در این مطالعه برای تخمین مقادیر تبخیر و تعرق واقعی از مدل SEBAL و از تصاویر ماهواره‌ای Landsat-TM در دو تاریخ ششم مرداد ۱۳۶۳ و دهم مرداد ۱۳۸۸ استفاده گردید. در این مطالعه، میزان تبخیر از سطح دریاچه در هر دو سال حدود ۷ تا ۹ میلی‌متر برآورد شد. بعلاوه، بیشترین میزان تبخیر و تعرق در سال ۱۳۶۳، در زمین‌های کشاورزی واقع در غرب و شمال غربی دریاچه با مقداری بین ۷ تا ۱۲ میلی‌متر برآورد شد. در مقابل، نتایج این مطالعه برای سال ۱۳۸۸ نشان می‌دهد که سطح زمین‌های کشاورزی با میزان تبخیر و تعرق بیشینه (بین ۷ تا ۱۲ میلی‌متر) در شمال غرب، غرب و جنوب غرب دریاچه افزایش یافته است. همچنین در این مطالعه نشان داده شده که استان آذربایجان غربی، بیشترین افزایش سطح زیر کشت و استان کردستان، کمترین افزایش سطح زیر کشت را داشته است (موسسه تحقیقات آب، ۱۳۹۲).

در مطالعه‌ای دیگر، به بررسی مؤلفه‌های مختلف بیلان آب شامل تغییرات حجم آبخوان، تبخیر از پیکره‌های آبی، تبخیر و تعرق واقعی و تغییرات رطوبت خاک با استفاده از تصاویر سنجنده MODIS (۸۴) تصویر برای دوره زمانی ۲۰۰۲ تا ۲۰۰۸ میلادی) و داده‌های ۷۴ ایستگاه باران‌سنجی و ۱۵ ایستگاه هیدرومتری با پنج روش شار انرژی شامل روش‌های تک منبعی SEBAL و METRIC و مدل‌های دو منبعی TSEB و STSEB به همراه مدل ترکیبی SEBAL-TSEB پرداخته شده و تبخیر و تعرق واقعی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه تخمین زده شده است. مقایسه نتایج این تحقیق با مقادیر لایسیمتر واقع در یک مزرعه در حوضه مطالعاتی نشان داد که از بین مدل‌های مطالعه شده، نتایج روش SEBAL، با درصد خطای متوسط ۱۹٪ در مقیاس روزانه، بیشترین همخوانی را با مقادیر اندازه‌گیری شده داراست. مقادیر میانگین تبخیر و

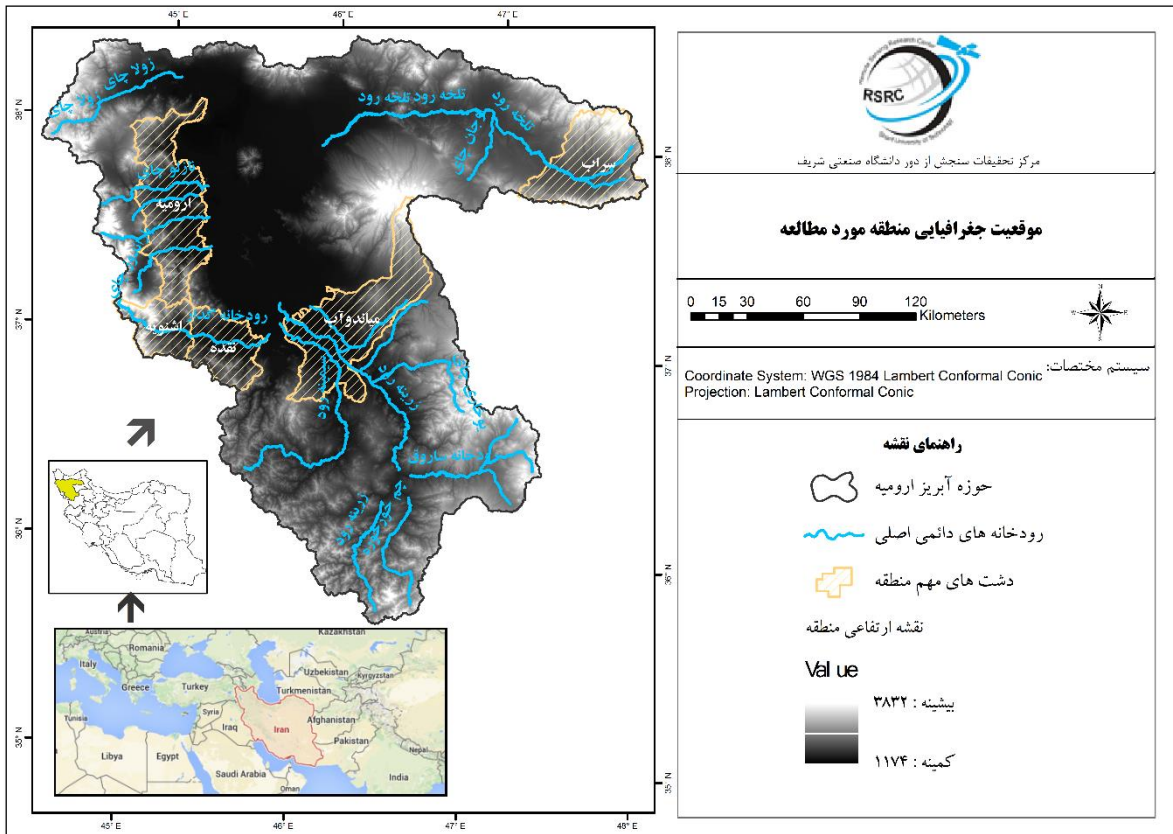
تعرق واقعی در سطح حوضه در مقیاس سالانه در این مطالعه طی سال‌های مذکور از ۲۱۵ تا ۳۴۹ میلی‌متر متغیر بوده و بیشترین میزان آن در سال ۲۰۰۶ میلادی و کمترین آن نیز در سال ۲۰۰۸ میلادی مشاهده گردید. به علاوه میزان تبخیر از پهنه‌های آبی، تغییراتی بین ۹۵۰ میلی‌متر و ۱۲۵۰ میلی‌متر را به ترتیب برای سال‌های ۲۰۰۳ و ۲۰۰۴ میلادی نشان داد (باقری هارونی، ۱۳۹۰).

۳- منطقه مورد مطالعه

دریاچه ارومیه در شمال غربی ایران، یکی از بزرگ‌ترین دریاچه‌های دائمی فوق شور در جهان و بزرگ‌ترین دریاچه از این نوع در خاورمیانه است که به لحاظ موقعیت جغرافیایی مابین استان‌های آذربایجان شرقی، کردستان و آذربایجان غربی و در محدوده‌ی ۳۶/۴۵ تا ۳۸/۲۰ درجه عرض شمالی و ۴۴/۵۰ تا ۴۶/۱۰ درجه طول شرقی استقرار یافته است (شکل ۲).

تغییرات بارندگی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه از حدود ۲۲۰ تا ۹۰۰ میلی‌متر بوده و از مناطق مرکزی حوضه به سوی مناطق مرتفع پیرامونی بر مقدار بارندگی افزوده می‌شود. بارش در مناطق غربی و جنوب حوضه قابل توجه است. ضمن آنکه هسته‌های نسبتاً پربارشی در ارتفاعات سهند و سبلان مشاهده می‌گردد. از نظر زمانی نیز حدود ۷۷ درصد ریزش‌ها بین آذر تا اردیبهشت رخ می‌دهد (موسسه تحقیقات آب و DLG، ۱۳۸۵).

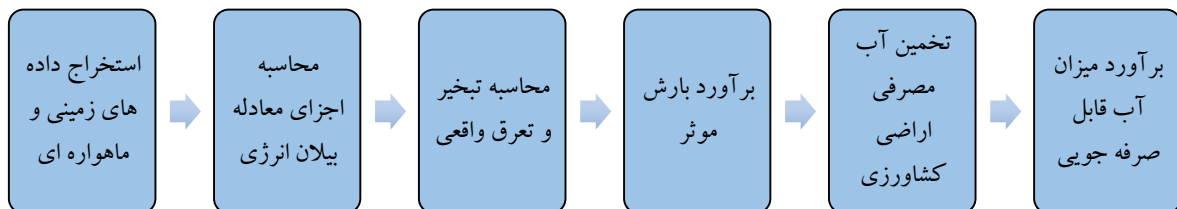
برخی از مهم‌ترین تغییرات عمده اکولوژیک در این حوضه آبریز، کاهش سطح دریاچه و ایجاد پهنه‌های وسیع شوره‌زار، افزایش غلظت نمک و تبدیل تالاب اقماری شورگل به مخزن ذخیره آب دائمی، خشک شدن تالاب یادگارلو در اثر احداث زهکش و وقوع پدیده‌ی تغذیه گرائی در اثر کاهش جریان‌های ورودی در تمامی تالاب‌های اقماری می‌باشد (موسسه تحقیقات آب و DLG، ۱۳۸۵). حداکثر سطح دریاچه در دوران پرآبی در حدود ۶۱۰۰ کیلومتر مربع ارزیابی شده است؛ با این حال، از سال ۱۹۹۵ میلادی وسعت دریاچه کاهش داشته و مطابق اطلاعات به دست آمده از تحلیل داده‌های ماهواره لندست، در اوت سال ۲۰۱۱ میلادی به ۲۳۶۶ کیلومتر مربع رسیده است (Pengra 2012).



شکل ۲- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه (حوضه آبریز دریاچه ارومیه)

۴- روش انجام کار

با توجه به اهداف کلی مطالعه و مرور مطالعات صورت گرفته، روند انجام تحقیق به صورت فلوچارت در شکل ۳ نشان داده شده است. در ادامه با توجه به این شکل، روش شناسی تحقیق و نتایج حاصل از آن ارائه خواهد شد.



شکل ۳- مراحل انجام مطالعه

در این مطالعه، مقادیر نرخ تبخیر و تعرق واقعی ابتدا با استفاده از روابط گام زمانی لحظه ای شارهای بیلان انرژی و با توجه به لحظه محلی دریافت تصاویر، محاسبه شده و در نهایت با استفاده از روش توصیه شده در

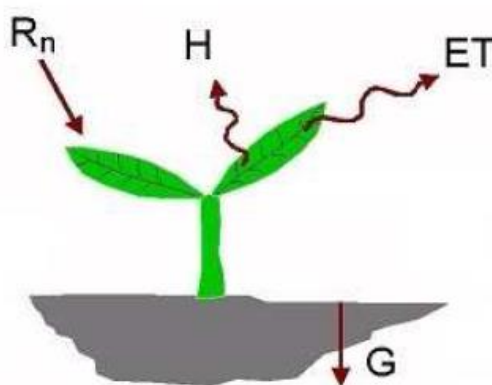
الگوریتم SEBAL برای گام‌های زمانی روزانه، ماهانه و فصلی تعمیم داده شده‌اند. در این بخش نخست به ارائه روابط گام زمانی لحظه‌ای و در ادامه به ارائه روابط گام زمانی روزانه پرداخته شده است.

۴-۱- مفاهیم و روابط الگوریتم SEBAL

در مدل SEBAL، نرخ تبخیر و تعرق واقعی با به کارگیری تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های هواشناسی و با استفاده از بیلان انرژی در سطح، محاسبه می‌شود. از آنجا که تصویر ماهواره‌ای تنها برای لحظه گذر ماهواره تأمین داده می‌کند، SEBAL یک شار لحظه‌ای ET برای زمان تصویر محاسبه می‌نماید. شار گرمای تبخیر برای هر پیکسل از تصویر، به عنوان باقیمانده رابطه بیلان انرژی سطح زمین تخمین زده می‌شود (شکل ۴):

$$\lambda ET = R_n - G - H \quad (1)$$

در رابطه بالا، λET شار گرمای نهان تبخیر و تعرق ($W.m^{-2}$)، R_n شار تشعشع خالص در سطح زمین ($W.m^{-2}$) و G شار گرمایی زمین ($W.m^{-2}$) و H جریان گرمای محسوس به سمت جو ($W.m^{-2}$) می‌باشند.



شکل ۴ - شماتیک بیلان انرژی در سطح زمین (Allen et al. 2002)

SEBAL می‌تواند ET واقعی را برای مناطق زراعی مسطح، با دقت و اطمینان مناسبی تخمین زند. برای به کارگیری این الگوریتم در مناطق کوهستانی نیاز به اصلاحات مربوط به ارتفاع، شیب و جهت شیب می‌باشد که در محاسبه هر پارامتر برحسب ضرورت و نیاز به اصلاح، به آن اشاره می‌شود.

۴-۱-۱- شار تشعشع خالص در سطح زمین (R_n)

گام نخست در روند محاسباتی الگوریتم SEBAL، محاسبه شار تشعشع خالص در سطح زمین (R_n) با استفاده از رابطه ذیل است (Allen et al. 2002):

$$R_n = (1 - \alpha) R_{s\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1 - \varepsilon_0) R_{L\downarrow} \quad (2)$$

که در آن $R_{s\downarrow}$ تابش ورودی طول موج کوتاه، $R_{L\downarrow}$ تابش ورودی طول موج بلند و $R_{L\uparrow}$ تابش خروجی طول موج بلند می باشد (تمامی پارامترهای فوق بر حسب $W.m^{-2}$ می باشند). α آلبدو و ε_0 گسیلمندی سطح می باشند.

۴-۱-۲- تابش طول موج کوتاه ورودی ($R_{s\downarrow}$)

شار تابشی طول موج کوتاه ورودی شامل مجموع شارهای تابشی مستقیم^۹ و نفوذی^{۱۰} رسیده به سطح زمین ($W.m^{-2}$) می باشد. این شار با فرض شرایط بدون ابر مطابق رابطه (۳) محاسبه می شود (Allen et al. 2002):

$$R_s = G_{sc} \times \cos \theta \times d_r \times \tau_{sw} \quad (3)$$

که در رابطه فوق G_{sc} ثابت خورشیدی (برابر با $1367 W.m^{-2}$)، $\cos \theta$ کسینوس زاویه برخورد اشعه خورشید به زمین، d_r مربع معکوس فاصله نسبی زمین و خورشید و τ_{sw} نیز مقدار گذردهی اتمسفری می باشد. در ادامه، نحوه محاسبه هر یک از پارامترهای معادله ۳ مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

زاویه ورود خورشیدی^{۱۱} (θ)، زاویه بین پرتو خورشیدی و خط عمود بر سطح زمین است. در مدل مسطح SEBAL فرض می گردد که سطح زمین افقی است و محاسبه $\cos \theta$ بسیار ساده و در سطح منطقه مورد نظر مقدار ثابت دارد. در مدل کوهستانی SEBAL، $\cos \theta$ در هر پیکسل متفاوت است و به شیب و جهت شیب سطح زمین بستگی دارد. SEBAL از رابطه زیر برای محاسبه $\cos \theta$ بهره می گیرد (Duffie and Beckman 1980):

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \sin(\delta) \sin(\varphi) \cos(s) - \sin(\delta) \cos(\varphi) \sin(s) \cos(\gamma) \\ & + \cos(\delta) \cos(\varphi) \cos(s) \cos(\omega) \\ & + \cos(\delta) \sin(\varphi) \sin(s) \cos(\gamma) \cos(\omega) \\ & + \cos(\delta) \sin(\varphi) \sin(s) \sin(\omega) \end{aligned} \quad (4)$$

در رابطه فوق، φ عرض جغرافیایی هر نقطه از نقشه، s شیب، ω زاویه ساعتی^{۱۲}، δ زاویه میل خورشید^{۱۳} و γ زاویه جهت شیب سطحی می باشد (تمامی موارد فوق بر حسب رادیان می باشند). نقشه های شیب و جهت شیب

^۹ direct

^{۱۰} diffuse

^{۱۱} solar incidence angle

^{۱۲} hour angle

^{۱۳} solar declination

با استفاده از لایه DEM تولید می گردند. زاویه میل خورشید از رابطه ارائه شده توسط Cooper به شرح زیر محاسبه می گردد (Cooper 1969):

$$\delta = 0.409 \sin\left(\frac{2\pi \cdot JD}{365} - 1.39\right) \quad (5)$$

که در اینجا JD روز ژولینانی مورد بررسی می باشد.

زاویه ساعتی نیز تابعی از زمان استاندارد محلی (t) است و به صورت زیر تعریف می شود (Allen et al. 2002):

$$\omega = \frac{\pi}{12} \{t + 0.06667(L_z - L_m) + S_c\} - 12 \quad (6)$$

که در اینجا t زمان گذر ماهواره بر حسب ساعت (برای مثال برای ساعت ۱۰:۳۰، ۱۰/۵ نوشته می شود)، L_z طول جغرافیایی مرکز منطقه زمانی^{۱۴} موجود در تصویر بر حسب دقیقه (که در این مطالعه منطقه زمانی مورد استفاده، تهران می باشد و طول جغرافیایی آن، ۵۱/۴۲ درجه است)، L_m طول جغرافیایی مرکز تصویر برداشت شده توسط ماهواره بر حسب دقیقه و S_c یک تصحیح فصلی برای زمان خورشیدی^{۱۵} می باشد که به صورت زیر اعمال می گردد (Allen et al. 2002):

$$S_c = 0.1645 \times \sin(2b) - 0.1255 \times \cos(b) - 0.025 \times \sin(b) \quad (7)$$

$$b = 2\pi(JD - 81)/364 \quad (8)$$

که در اینجا JD روز ژولینانی تصویر مورد بررسی می باشد.

d_r همان طور که پیش تر گفته شد مربع معکوس فاصله نسبی زمین و خورشید می باشد و به وسیله رابطه زیر محاسبه می شود (Duffle and Beckman 1980):

$$d_r = 1 + 0.033 \times \cos\left(JD \frac{2\pi}{365}\right) \quad (9)$$

که در اینجا JD شماره روز مورد محاسبه (روز ژولینانی) می باشد.

^{۱۴} local time zone

^{۱۵} Solar time

گذردهی اتمسفری (τ_{sw}) نیز با فرض شرایط اتمسفری بدون ابر و نسبتاً خشک، با استفاده از رابطه زیر که توسط نشریه FAO-56 توصیه شده، محاسبه می گردد (Allen et al. 1998):

$$\tau_{sw} = 0.75 + 2 \times 10^{-5} \times z \quad (10)$$

که در اینجا z ، ارتفاع از سطح دریا بر حسب متر می باشد (در این محاسبات از نقشه DEM منطقه استفاده شده است).

۴-۱-۳- تابش طول موج بلند خروجی ($R_{L\uparrow}$)

تابش طول موج بلند خروجی، شار تابشی حرارتی است که از سطح زمین به اتمسفر منتشر می شود ($W.m^{-2}$) این پارامتر در الگوریتم SEBAL با استفاده از رابطه استفان-بولتزمن محاسبه می شود:

$$R_{L\uparrow} = \varepsilon_0 \times \sigma \times T_s^4 \quad (11)$$

که در آن ε_0 گسیلمندی سطح باند گسترده^{۱۶} (بدون بعد)، σ ثابت استفان بولتزمن ($5.67 \times 10^{-8} W.m^{-2}.K^{-4}$)، و T_s دمای سطح زمین (K) هستند. نقشه دمای سطح (T_s) به صورت محصول آماده با دقت مکانی ۱ کیلومتر و دقت زمانی ۵ دقیقه از سنجنده MODIS و در لحظه تصویر دریافت می شود (به جدول ۲ مراجعه شود). مقادیر $R_{L\uparrow}$ از ۲۰۰ تا ۷۰۰ وات بر مترمربع با توجه به زمان و موقعیت تصویر می تواند تغییر نماید.

گسیلمندی سطح (ε_0)، راندمان انتشار طول موج بلند توسط سطح می باشد و در سنجنده MODIS، ناشی از باند پهن است. این پارامتر بوسیله رابطه توسعه داده شده توسط Van de Griend و Owe بصورت زیر محاسبه می شود (Van de Griend and Owe 1993):

$$\varepsilon_0 = 1.0094 + 0.047 \times \ln(NDVI) \quad (12)$$

NDVI شاخص نرمال شده اختلاف پوشش گیاهی است که جهت تعیین مقدار و تراکم پوشش گیاهی در سطح زمین استفاده می شود و از اختلاف بازتابش باند محدوده قرمز و فرورسرخ (که در این محدوده نرمال شده اند) به دست می آید.

^{۱۶} broad-band

۴-۱-۴- تابش طول موج بلند ورودی ($R_{L\downarrow}$)

تابش طول موج بلند ورودی، شار تابشی حرارتی رو به پایین از اتمسفر می باشد ($W.m^{-2}$). این پارامتر نیز با استفاده از رابطه استفان-بولتزمن بصورت زیر محاسبه می شود:

$$R_{L\downarrow} = \varepsilon_a \times \sigma \times T_a^4 \quad (13)$$

که در آن ε_a گسیلمندی اتمسفر (بدون بعد)، σ ثابت استفان بولتزمن ($5.67 \times 10^{-8} W.m^{-2}.K^{-4}$)، و T_a دمای هوا در نزدیکی سطح زمین (K) هستند. مقادیر $R_{L\downarrow}$ از ۲۰۰ تا ۵۰۰ وات بر مترمربع با توجه به زمان و موقعیت تصویر می تواند تغییر کند.

محاسبه گسیلمندی اتمسفر با استفاده از رابطه (۱۴)، که توسط Bastiaanssen برای غرب مصر استخراج شده است، صورت می گیرد (Bastiaanssen 1995):

$$\varepsilon_a = 1.08 \times (-\ln \tau_{sw})^{0.265} \quad (14)$$

در این رابطه τ_{sw} گذردهی اتمسفری می باشد و توسط رابطه ۱۰ محاسبه می شود.

دمای هوای مورد استفاده در رابطه (۱۳)، در روش SEBAL معمولی، دمای هوای پیکسل سرد (T_{cold}) می باشد. در روش اصلاح شده، این دما برای هر پیکسل با استفاده از نقشه DEM به صورت زیر اصلاح می شود (Allen et al. 2002):

$$T_{cold(each\ pixel)} = T_{cold} + 0.0065 \Delta Z \quad (15)$$

که در این رابطه ΔZ برابر است با اختلاف ارتفاع پیکسل سرد و ارتفاع هر پیکسل. ارتفاع پیکسل سرد با استفاده از نقشه DEM منطقه و با وارد کردن مختصات این پیکسل بدست می آید.

در نهایت، بمنظور تولید محصول لحظه ای آلبدو، آلبدوی سطحی باند پهن از رابطه (۱۶) محاسبه می شود (Starks et al. 1991):

$$\alpha = 0.215 \times Ref_1 + 0.266 \times Ref_2 + 0.242 \times Ref_3 + 0.129 \times Ref_4 + 0.112 \times Ref_6 + 0.036 \times Ref_7 \quad (16)$$

که Ref_i مقادیر تابش باندهای ۱ تا ۷ به جز باند ۵ می باشد. پس از محاسبه ترم های ذکر شده، مقدار R_n برآورد می شود.

۴-۱-۵- شار گرمایی زمین (G)

شار گرمایی زمین در واقع نرخ ذخیره حرارت در خاک و گیاه در اثر انتقال است. SEBAL ابتدا نسبت G/R_n را با استفاده از رابطه تجربی (۱۷) که توسط Bastiaanssen ارائه شده تخمین می‌زند (Bastiaanssen, 2000):

$$\frac{G}{R_n} = T_s / \alpha (0.0038\alpha + 0.0074\alpha^2) (1 - 0.98NDVI^4) \quad (17)$$

که در آن، T_s دمای اصلاح نشده سطح (K)، α آلبدوی سطح (Broadband Albedo) و NDVI شاخص پوشش گیاهی است. قابل ذکر است رابطه (۱۷)، مقادیر G/R_n را برای سطوح خاک و گیاه برآورد می‌کند و برای سایر سطوح (آب و برف) مقدار ۰/۵ استفاده می‌شود (Allen et al. 2002). در مناطق کوهستانی نیز روند تخمین G به صورت فوق می‌باشد و نیازی به اصلاح T_s و سایر پارامترها نمی‌باشد.

۴-۱-۶- شار حرارتی محسوس (H)

شار حرارتی محسوس، در واقع هدر رفت حرارت به هوا از طریق همرفت و انتقال می‌باشد. رابطه بکار رفته جهت محاسبه این ترم مطابق ذیل می‌باشد (Allen et al. 2002):

$$H = (\rho \times C_p \times dT) / r_{ah} \quad (18)$$

که در آن ρ چگالی هوا (kg.m^{-3})، C_p گرمای ویژه در فشار معین ($1004 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$)، dT اختلاف دمای هوای (K) بین دو ارتفاع مشخص (که طبق پیشنهاد دستورالعمل SEBAL، ۰/۱ متر و ۲ متر در نظر گرفته می‌شود) و r_{ah} مقاومت آئرودینامیکی در برابر انتقال حرارت (Sday.m^{-1}) است (Allen et al. 2002). حل رابطه (۱۸) به جهت وجود دو پارامتر نامشخص dT و r_{ah} مشکل است. جهت تسهیل این محاسبه، از دو پیکسل "سرد" و "گرم" (که در آن‌ها می‌توان H را پیش‌بینی نمود و dT را تخمین زد) و سرعت باد در یک ارتفاع مشخص استفاده شده است. مقاومت آئرودینامیکی در برابر انتقال حرارت (r_{ah}) و شار حرارتی محسوس مطابق با روابط ارائه شده در الگوریتم شماتیک شکل ۵ محاسبه می‌شوند.

➤ انتخاب پیکسل‌های سرد و گرم

الگوریتم SEBAL جهت محاسبات نرخ تبخیر و تعرق واقعی، از دو پیکسل مبنا جهت تعیین حدود بالا و پایین بیلان انرژی در سطح استفاده می‌کند. این دو پیکسل با نام‌های "سرد" و "گرم" در محل تشخیص داده شده توسط کاربر، تعیین می‌شوند. پیکسل "سرد" می‌بایست در محلی مرطوب، آبیاری شده و با پوشش گیاهی

کامل در سطح زمین، انتخاب شود. در این پیکسل، فرض می شود که دمای سطح و دمای هوای نزدیک به سطح با هم برابرند. پیکسل "گرم" نیز می بایست در یک منطقه زراعی خشک که تبخیر و تعرقی در آن رخ نمی دهد، انتخاب گردد. هر دوی این پیکسل ها می بایست در مناطقی بزرگ و همگن واقع شده باشند. انتخاب این پیکسل ها نیازمند مهارت و تجربه می باشد و کیفیت محاسبات ET در الگوریتم SEBAL به انتخاب دقیق این پیکسل ها بستگی دارد. نحوه انتخاب پیکسل های "سرد" و "گرم" در دستورالعمل SEBAL تشریح داده شده است (Allen et al. 2002). مختصات این پیکسل ها در مراحل بعدی محاسبه، استفاده می گردد.

نکات ذیل در مورد تخمین Γ_{ah} قابل توجه است:

۱. سرعت اصطکاکی (u_*) برای شرایط اتمسفری خنثی با استفاده از داده های ایستگاهی تولید می شود.

$$u_* = \frac{ku_x}{\ln\left(\frac{z_x}{z_{0m}}\right)} \quad (19)$$

که در آن، u_x سرعت باد اندازه گیری شده در ایستگاه هواشناسی (معمولاً در ارتفاع ۱۰ متر) $(m.s^{-1})$ ، k ثابت بدون بعد فون کارمن (0.41) و z_{0m} طول زبری مومنتم برای هر پیکسل (m) می باشند.

۲. طول زبری مومنتوم (z_{0m}) با استفاده از روابط تجربی الگوریتم SEBS و با استفاده از نقشه LAI^v که به صورت محصولی آماده از سنجنده MODIS دریافت می شود (به جدول ۲ مراجعه شود) محاسبه می گردد (Su et al. 2001). شاخص LAI یک کمیت بدون بعد است که رشد برگ گیاهان را مشخص می کند و برابر با اندازه سطح یک طرف برگ های گیاه در یک واحد از سطح زمین است. رابطه (20) مقدار طول زبری مومنتوم (z_{0m}) را برآورد می کند:

$$\frac{u_*}{u(h)} = c_1 - c_2 e^{-c_3 C_d LAI} \quad (20)$$

$$n = \frac{C_d LAI}{2 u_*^2 / u(h)^2}$$

$$\frac{d}{h} = 1 - \frac{1 - e^{-2n}}{2n}$$

$$\frac{z_{0m}}{h} = \left(1 - \frac{d}{h}\right) e^{-ku(h)/u_*}$$

^v Leaf Area Index

در روابط بالا، u_* سرعت اصطکاک^{۱۸} که برابر است با $(\frac{\tau_0}{\rho})^{1/2}$ ، τ_0 تنش برشی سطحی، ρ چگالی هوا، $u(h)$ سرعت افقی باد در ارتفاع h گیاه، c_1 ، c_2 و c_3 ضرایب تجربی که به ترتیب برابر با $0/۲۶۴$ ، $0/۳۲۰$ و $۱۵/۱$ ، ضریب نیروی عقب ران اجزای برگ، LAI شاخص سطح برگ، n ضریب کاهش پروفیل سرعت باد در گیاه، d ارتفاع جابجایی (ارتفاع مؤثر نیروی عقب ران بر اجزای گیاه)، k ثابت کارمن^{۱۹} (برابر با $0/۴$) و Z_{om} ارتفاع زبری برای انتقال مومنت هستند.

در مناطق کوهستانی لازم است طول زبری مومنتوم (Z_{om}) بر اساس شیب منطقه و با استفاده از رابطه (۲۱) اصلاح شود (Allen et al. 2002):

$$Z_{om(mnt)} = Z_{om} \times [1 + (slope - 5)/20] \quad (21)$$

که در آن slope نقشه شیب منطقه بر حسب رادیان می باشد.

۳. سرعت باد در ارتفاعی که هیچ گونه تأثیری از زبری سطح قابل تصور نمی باشد (۲۰۰ متر) محاسبه می گردد. رابطه u_{200} در واقع همان رابطه (u_*) می باشد (Allen et al. 2002):

$$u_{200} = u_* \frac{\ln(\frac{Z_{200}}{Z_{om}})}{k} \quad (22)$$

در مناطق کوهستانی لازم است تا سرعت باد در ارتفاع ۲۰۰ متری (u_{200}) بر اساس تأثیرات ارتفاعی اصلاح گردد. بنابراین ضریب وزنی سرعت باد در کوهستان به صورت رابطه (۲۳) تعیین می گردد (Allen et al. 2002):

$$\omega = 1 + 0.1[(h - H)/1000] \quad (23)$$

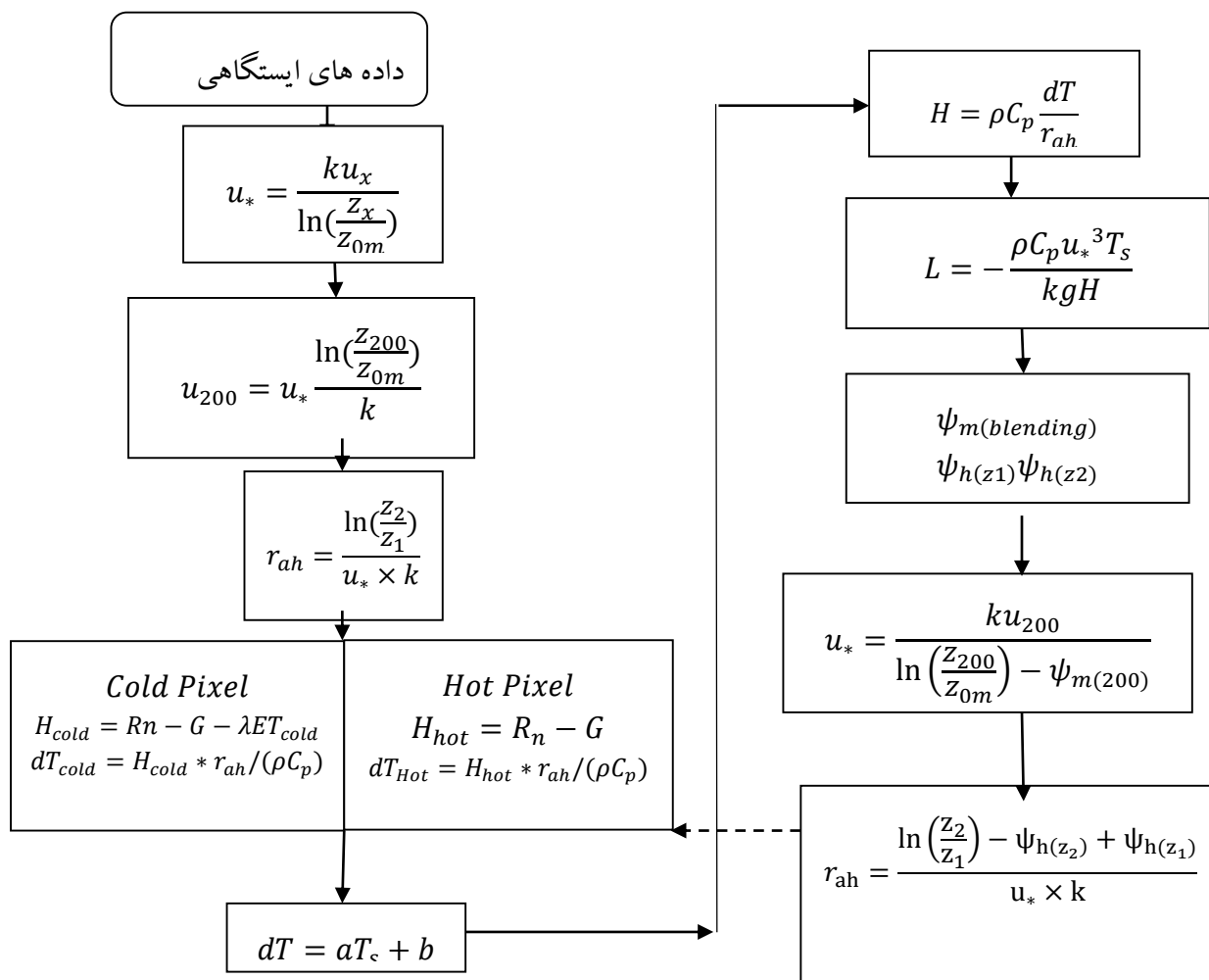
که در آن مقصود از h ، ارتفاع هر پیکسل و H ارتفاع مکان اندازه گیری سرعت باد می باشد. u_{200} در هر پیکسل با ضرب کردن در ضریب (ω) تنظیم می شود.

۴. انجام یکسری محاسبات تکراری جهت در نظر گرفتن تأثیرات ناپایداری بر r_{ah} و H ضروری است. بنابراین با فرض شرایط خنثی یک مقدار اولیه برای r_{ah} محاسبه می شود. Z_1 ارتفاعی نزدیک به صفحه تغییر

^{۱۸} Friction Velocity

^{۱۹} Von Karman

مکان صفر^{۲۰} برای سطح یا پوشش گیاهی و Z_2 ارتفاعی بالاتر از صفحه تغییر مکان صفر و پایین تر از لایه مرزی سطح^{۲۱} می باشد. بر اساس تحلیل های تجربی مقدار Z_1 برابر ۰/۱ و مقدار Z_2 برابر ۲ متر در نظر گرفته می شود (Allen et al. 2002)



شکل ۵ - دیاگرام محاسبه شار حرارتی محسوس (Allen et al. 2002)

جهت محاسبه شار حرارتی محسوس با استفاده از رابطه (۱۸) لازم است اختلاف دما در نزدیکی سطح زمین (dT) برای هر پیکسل تعیین گردد. این پارامتر در واقع اختلاف دما را در دو سطح ارتفاعی Z_1 و Z_2 نشان

^{۲۰} Zero plane displacement

^{۲۱} Surface boundary layer

می دهد. از آنجا که اندازه گیری دما در این سطوح وجود ندارد، در الگوریتم SEBAL فرض می گردد که رابطه ای خطی بین dT و T_s برقرار است (Allen et al. 2002).

$$dT = b + aT_s \quad (24)$$

که در آن a و b ضرایب همبستگی می باشند.

در مناطق کوهستانی، جهت به دست آوردن تخمین مناسب تر از dT لازم است که دمای سطح بکار رفته در این رابطه بر اساس ارتفاع اصلاح شود. بنابراین در مدل اصلاح شده SEBAL در مناطق کوهستانی، یک نقشه دمای سطح مصنوعی باهدف محاسبه dT تولید می شود. در این لایه فرض می شود (همانند آنچه که در پروفیل دمای هوای مشاهده می شود)، نرخ کاهش دمای سطح با توجه به ارتفاع، افزایش پیدا می کند. دمای اصلاح شده سطح بر اساس DEM منطقه و از رابطه زیر به دست می آید (Allen et al. 2002):

$$T_{s-dem} = T_s + 0.0065\Delta z \quad (25)$$

که در آن Δz اختلاف ارتفاع هر پیکسل و ارتفاع مبنا برحسب متر است (معمولاً ارتفاع ایستگاه هواشناسی به عنوان ارتفاع مبنای تصویر مورد استفاده قرار می گیرد).

جهت تعیین ضرایب a و b ، SEBAL از دو پیکسل سرد و گرم که می توان در آن ها مقدار H را به شکل قابل قبولی محاسبه نمود، استفاده می کند. در مورد تخمین dT و H می توان به موارد زیر اشاره نمود:

۱. بر اساس دستورالعمل SEBAL، می توان نرخ ET در پیکسل "سرد" را $1/0.5$ برابر تبخیر و تعرق پتانسیل گیاه مرجع در نظر گرفت (Allen et al. 2002). بنابراین H و dT در پیکسل سرد مطابق روابط (۲۶) و (۲۷) قابل محاسبه است:

$$H_{cold} = R_n - G - 1.05\lambda ET_r \quad (26)$$

$$dT_{cold} = H_{cold} \times r_{ah_{cold}} / (\rho_{cold} \times c_p) \quad (27)$$

۲. برای محاسبه تبخیر و تعرق مرجع در محل پیکسل سرد از شکل استاندارد شده رابطه ASCE Penman-Monteith استفاده خواهد شد (ASCE-EWRI 2005). رابطه زیر شکل استاندارد شده رابطه تبخیر و تعرق گیاه مرجع ASCE برای گام های زمانی ساعتی و روزانه را نشان می دهد. مقادیر ثابت های C_n و C_d از جدول ۱ تعیین می گردد.

$$ET_{ref} = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{C_n}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + C_d u_2)} \quad (28)$$

ET_{ref} : تبخیر و تعرق گیاه مرجع ($mm.day^{-1}$ یا $mm.hour^{-1}$)

R_n : تشعشع خالص در سطح پوشش گیاهی ($MJ.m^{-2}.day^{-1}$) یا ($MJ.m^{-2}.hour^{-1}$)

G : شار گرمایی خاک ($MJ.m^{-2}.day^{-1}$) یا ($MJ.m^{-2}.hour^{-1}$)

T : میانگین روزانه یا ساعتی دمای هوا در ارتفاع ۱/۵ تا ۲/۵ متری (C)

U_2 : میانگین روزانه یا ساعتی سرعت باد در ارتفاع ۲ متری ($m.s^{-1}$)

e_s : میانگین فشار بخار اشباع در ارتفاع ۱/۵ تا ۲/۵ متری (kPa) برای محاسبات روزانه، میانگین e_s محاسبه شده

برای دمای هوای حداقل و حداکثر

e_a : میانگین فشار بخار واقعی در ارتفاع ۱/۵ تا ۲/۵ متری (kPa)

Δ : شیب منحنی دما- فشار بخار ($kPa.C^{-1}$)

γ : ثابت سایکرومتریک ($kPa.C^{-1}$)

جدول ۱- مقادیر ثابت C_n و C_d جهت محاسبه تبخیر و تعرق مرجع (ASCE-EWRI 2005)

واحد اندازه گیری برای ET_r	ET مرجع بلندمدت		گام زمانی محاسبات
	C_n	C_d	
$mm.d^{-1}$	۱۶۰۰	۰/۳۸	روزانه و ماهانه
$mm.d^{-1}$	۶۶	۰/۲۵	ساعتی در روز
$mm.d^{-1}$	۶۶	۱/۷	ساعتی در شب

به منظور محاسبه ثابت سایکرومتریک، فشار بخار اشباع، فشار بخار واقعی و شیب منحنی فشار بخار از روابط

زیر استفاده گردیده است:

$$\gamma = \frac{C_p}{\epsilon \lambda} = 0.665 \times 10^{-3} P \quad (29)$$

γ : ثابت سایکرومتریک ($kPa.C^{-1}$)

P : فشار اتمسفر (kPa)

λ : گرمای نهان تبخیر، ۲/۴۵ ($MJ.kg^{-1}.C^{-1}$)

C_p : گرمای ویژه در فشار ثابت، $(MJ.kg^{-1}.C^{-1}) \times 10^{-3} \times 0.13$

ϵ : نسبت وزن مولکولی بخار آب به هوای خشک (معادل ۰/۶۲۲)

$$T_{mean} = \frac{T_{max} + T_{min}}{2} \quad (30)$$

T_{max} : حداکثر دمای هوای روزانه ($^{\circ}C$)

T_{min} : حداقل دمای هوای روزانه ($^{\circ}C$)

$$e^0(T) = 0.6108 \exp\left[\frac{17.27T}{T+273}\right] \quad (31)$$

$e^0(T)$: فشار بخار اشباع در دمای T [kPa]

T : دمای هوا [$^{\circ}C$]

$$e_s = \left[\frac{e^0(T_{max}) + e^0(T_{min})}{2} \right] \quad (32)$$

$$\Delta = \frac{2504 \times \exp\left(\frac{17.27T}{T+237.3}\right)}{(T+237.3)^2}$$

Δ : شیب منحنی دما- فشار بخار (kPa/C)

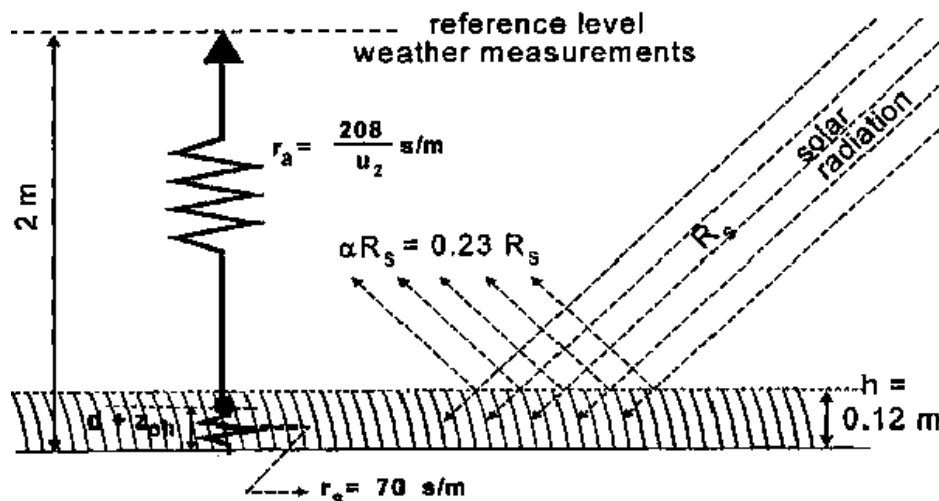
T : دمای هوا ($^{\circ}C$)

در محاسبه e_s ، در صورت محاسبه برای بازه زمانی روزانه، از همان $e^0(T)$ استفاده گردیده؛ با این تفاوت که از دمای متوسط روزانه به عنوان T استفاده شده است.

$$e_a = e^0(T_{dew}) = 0.6188 \exp\left[\frac{17.27T_{dew}}{T_{dew}+237.3}\right] \quad (33)$$

T_{dew} : دمای نقطه شبنم ($^{\circ}C$)

جهت محاسبه e_a ، از داده های روزانه و لحظه عبور ماهواره ایستگاه های سینوپتیک استفاده شده است. به منظور ساده سازی تخمین تبخیر و تعرق گیاه مرجع با استفاده از این روش، روند محاسبات در نرم افزار Excel و به صورت خودکار صورت گرفته است. مشخصات گیاه مرجع نیز به صورت شماتیک در شکل ۶ نمایش داده شده است.



شکل ۶- مشخصات گیاه مرجع به صورت شماتیک (ASCE-EWRI 2005)

۳. در پیکسل "گرم" (خشک)، که از سطحی خشک و فاقد پوشش گیاهی انتخاب می شود فرض می گردد که نرخ تبخیر و تعرق واقعی برابر صفر است. در پیکسل سرد نیز که در محلی مرطوب و آبیاری شده و با پوشش گیاهی کامل انتخاب می گردد فرض بر وجود بیشترین نرخ تبخیر و تعرق واقعی می باشد (Allen et al. 2002).

۴. با محاسبه dT_{hot} و dT_{cold} و با استفاده از دمای سطح پیکسل های مورد نظر می توان مقادیر a و b را به دست آورد. بدین ترتیب در هر پیکسل، مقدار dT قابل تعیین است.

۵. با استفاده از رابطه $T_a = T_s - dT$ ، دمای هوا تعیین شده و با استفاده از آن، تخمینی از چگالی هوا (ρ) در پیکسل های "سرد" و "گرم" به دست می آید.

۶. در این مرحله با استفاده از رابطه (۱۸) مقدار شار حرارتی محسوس (H) برای هر پیکسل در شرایط اتمسفری خنثی به دست می آید.

۷. جهت وارد نمودن تأثیرات شناوری که از گرم شدن سطح ناشی می شود، SEBAL از تئوری Monin-Obukhov در یک روند تکراری استفاده می کند. شرایط پایداری اتمسفر، بخصوص در شرایط خشک، تأثیر زیادی بر مقاومت آئرو دینامیکی (Γ_{ah}) داشته و لازم است در محاسبه شار حرارتی محسوس (H) در نظر گرفته شود. SEBAL جهت اصلاح تأثیرات شناوری، محاسبه H را در یک روند تکراری ادامه می دهد تا مقدار Γ_{ah} پایدار شود.

طول Monin-Obukhov (L) جهت تعیین شرایط پایداری اتمسفر در این روند تکراری محاسبه می گردد:

$$L = -\frac{\rho C_p u_*^3 T_s}{kgH} \quad (34)$$

که در آن، ρ چگالی هوا (kg/m^3)، C_p حرارت مخصوص هوا (1001 J/kg/K)، u_* سرعت اصطکاکی (m/s)، T_s دمای سطح (K)، g ثابت جاذبه (9.81 m/s^2)، و H شار حرارتی محسوس (W/m^2) است. مقادیر L شرایط پایداری اتمسفر را تعریف می کند. اگر $L < 0$ ، اتمسفر غیر پایدار، اگر $L > 0$ اتمسفر پایدار و اگر $L = 0$ اتمسفر خنثی در نظر گرفته می شود.

با توجه به شرایط اتمسفری، مقادیر اصلاح پایداری برای مونتوم و انتقال حرارت (ψ_m و ψ_h) با استفاده از فرمول های ارائه شده توسط Webb محاسبه می شود (Webb et al. 1971).
اگر $L < 0$ ، شرایط غیر پایدار است:

$$\psi_{m(200m)} = 2 \ln\left(\frac{1+x(200m)}{2}\right) + \ln\left(\frac{1+x(200m)^2}{2}\right) - 2 \text{ARCTAN}(x(200m)) + 0.5 \pi \quad (35)$$

$$\psi_{h(z)} = 2 \ln\left(\frac{1+x(z)^2}{2}\right) \quad (36)$$

که در آن

$$x(z) = (1 - 16 \frac{z}{L})^{0.25} \quad (37)$$

و اگر $L > 0$ ، شرایط پایدار خواهد بود:

$$\psi_{m(200m)} = -5 \left(\frac{z}{L}\right) \quad (38)$$

$$\psi_{h(z)} = -5 \left(\frac{z}{L}\right) \quad (39)$$

اگر شرایط اتمسفری خنثی باشد ($L = 0$)، آنگاه هر دوی ψ_m و $\psi_h(z)$ برابر صفر هستند.

در این مرحله مقدار اصلاح شده سرعت اصطکاکی (u_*) با توجه به شرایط اتمسفر محاسبه می گردد:

$$u_* = \frac{k u_{200}}{\ln\left(\frac{z_{200}}{z_{0m}}\right) - \psi_{m(200)}} \quad (40)$$

که در آن، u_{200} سرعت باد در ارتفاع ۲۰۰ متر (m.s^{-1})، k ثابت فون کارمن (0.41)، z_{0m} طول زبری برای هر پیکسل (m)، و $\psi_m(200m)$ اصلاح پایداری برای انتقال مونتوم در ارتفاع ۲۰۰ متر است.

با اصلاح سرعت اصطکاکی، می توان مقدار اصلاح شده برای مقاومت آئرو دینامیکی در برابر انتقال حرارت (r_{ah}) را در هر مرحله تکرار، بدین ترتیب به دست آورد:

$$r_{ah} = \frac{\ln\left(\frac{z_2}{z_1}\right) - \psi_{h(z_2)} + \psi_{h(z_1)}}{u_* \times k} \quad (41)$$

که کلیه پارامترها در بندهای قبل معرفی شده اند.

در ادامه، مراحل کار از بند سوم با محاسبه dT آغاز شده و به ترتیب بالا ادامه پیدا می کند. این روند تکراری تا میل پارامترهای dT و r_{ah} در پیکسل "گرم" و "سرد" به مقداری پایدار ادامه پیدا می کند. در نهایت مقدار نهایی شار حرارتی محسوس در هر پیکسل محاسبه می شود.

۴-۲- تخمین نرخ تبخیر و تعرق واقعی

۴-۲-۱- نرخ تبخیر و تعرق لحظه ای (ET_{inst})

ارتفاع تبخیر و تعرق لحظه ای از رابطه (۴۲) قابل محاسبه است (Allen et al. 2002):

$$ET_{inst} = 3600 \frac{\lambda ET}{\lambda \rho_w} \quad (42)$$

که در آن ET_{inst} ارتفاع تبخیر و تعرق لحظه ای ($mm.hr^{-1}$)، عدد ۳۶۰۰ تبدیل واحد زمان از ثانیه به ساعت، λ گرمای نهان تبخیر یا گرمای جذب شده برای تبخیر یک کیلوگرم آب ($J.kg^{-1}$) و ρ_w چگالی آب (معادل $1000 Kg.m^{-3}$) می باشد. λET ($W m^{-2}$) بیانگر شار گرمای نهان تبخیر می باشد که طبق رابطه (۱) از تفاضل H و G از R_n بدست می آید.

نسبت ET مرجع (ET_{TrF}^{**}) نیز به عنوان نسبت ET لحظه ای (ET_{inst}) در هر پیکسل به ET مرجع (ET_r)

(که با استفاده از داده های هواشناسی به دست می آید)، مطابق رابطه زیر تعریف می شود:

$$ET_{TrF} = \frac{ET_{inst}}{ET_r} \quad (43)$$

که در آن ET_{inst} از رابطه ۳۹ ($mm.hr^{-1}$) و ET_r تبخیر و تعرق گیاه مرجع ($mm.hr^{-1}$) در زمان تصویر است.

ET_{TrF} جهت تبدیل ET لحظه ای به دوره ۲۴ ساعته بکار می رود.

** reference ET fraction

۲-۲-۴- نرخ تبخیر و تعرق واقعی روزانه (ET₂₄)

جهت محاسبه ET روزانه در الگوریتم SEBAL، فرض می گردد که ET_{rF} لحظه ای معادل میانگین ۲۴ ساعته این پارامتر است. بنابراین ET₂₄ بر حسب میلی متر در روز و از رابطه (۴۴) محاسبه می شود:

$$ET_{24} = ETrF \times ET_{r-24} \quad (44)$$

که در آن ET_{r-24} مقدار تجمعی ET_r در طول ۲۴ ساعت روز تصویر است و با استفاده از رابطه (۳۴) محاسبه می شود.

۳-۲-۴- نرخ تبخیر و تعرق واقعی فصلی (ET_{seasonal})

نقشه نرخ تبخیر و تعرق واقعی فصلی با استفاده از داده های نرخ تبخیر و تعرق واقعی ۲۴ ساعته تخمین زده می شود. مراحل تبدیل مقدار تبخیر و تعرق از بازه ۲۴ ساعته به بازه فصلی به شرح زیر است:

۱. تعیین طول فصل موردنظر
۲. تعیین دوره زمانی که هر تصویر ماهواره ای (در آن فصل موردبررسی)، نماینده آن تعداد روز می باشد
۳. محاسبه ET_r تجمعی برای دوره زمانی مشخص شده در مرحله قبل (برابر با مجموع مقادیر ET_r روزانه در این دوره زمانی).

۴. محاسبه ET تجمعی در هر دوره زمانی با توجه به رابطه زیر صورت می گیرد:

$$ET_{period} = ETrF_{period} \cdot \sum_{1}^n ET_{r-24} \quad (45)$$

که در آن، ET_{rFperiod} نماینده ET_{rF} در آن دوره، ET_{r-24} مقدار روزانه ET_r، و n تعداد روزهای دوره زمانی است. واحد ET_{period} میلی متر و ET_{r-24} بر حسب mm/day می باشد.

۵. در نهایت ET فصلی از مجموع مقادیر ET_{period} برای طول فصل بر حسب میلی متر به دست می آید.

۳-۳-۴- محاسبات نقشه های بارش

بارندگی یکی از متغیرهای اقلیمی است که به عنوان محرک چرخه هیدرولوژیکی، از اهمیت زیادی برخوردار است و مدیریت جامع حوضه های آبخیز در گرو درک صحیح از الگوهای مکانی و زمانی بارش و همچنین پیش بینی درازمدت آن می باشد. اطلاعات صحیح و به هنگام از بارندگی نقش بسزایی در فهم چرخه های آب و انرژی جهانی و مدیریت منابع آبی نظیر مدیریت کشاورزی، کاهش آسیب وقوع سیل، پیش بینی

خشک سالی و ... دارد (Schneider et al. 2008). همچنین مقدار بارش، به عنوان ورودی اصلی بسیاری از مدل های اقلیمی، اکولوژیکی و بیلان آب ایفای نقش نموده و بدیهی است با دستیابی به موقع به اطلاعات صحیح بارندگی، پیشرفت مدیریتی چشمگیری در حل مسائل زیست محیطی حاصل می شود.

آمار ایستگاه های زمینی سینوپتیک مربوط به سال ۲۰۱۰ میلادی از سایت سازمان هوا شناسی کشور دریافت و با اختصاص طول و عرض جغرافیایی و مقادیر بارش ماهانه در نرم افزار GIS، ابتدا نقشه های نقطه ای بارش تولید شده است. طبق بررسی های صورت گرفته توسط سیما، از بین روش های مختلف درون یابی، روش میانگین وزنی با فاصله معکوس (IDW^{۳۳}) با توان ۲ برای درون یابی استفاده شده است. با اعمال روش مذکور، نقشه های نقطه ای تولید شده به نقشه سطحی (رستر) تبدیل گردید (سیما، ۱۳۹۲).

توجه به این نکته در مورد آماده سازی آمار بارش ایستگاه های وزارت نیرو ضروری است که اطلاعات بارش بر اساس سال آبی ثبت شده اند و برای داشتن آمار کامل سال ۲۰۱۰ میلادی، ایستگاه هایی باید انتخاب شوند که هم در سال آبی ۸۹-۱۳۸۸ و هم در سال آبی ۹۰-۱۳۸۹ دارای داده بارش باشند. نکته مهم دیگر در آماده سازی آمار ایستگاه های وزارت نیرو، توجه به این مسئله است که این داده ها در تقویم شمسی تولید شده اند و لذا جهت مقایسه آنها با داده های پایگاه های جهانی، باید تاریخ ثبت داده ها از شمسی به میلادی تبدیل شود.

در گام بعدی، ایستگاه هایی که دارای داده های با کیفیت نامرغوب بودند طبق مطالعات قاجارنیا و همکاران حذف گردیدند (قاجارنیا و همکاران، ۲۰۱۴). سپس با کمک نرم افزار GIS، طول و عرض جغرافیایی متناظر با ایستگاه های ثبت بارش به آنها الحاق شده و اطلاعات حاصل، به صورت لایه مکانی حاوی آمار بارش ماهانه، آماده سازی گردید.

۴-۴- محاسبه میزان آب قابل صرفه جویی در اراضی کشاورزی

برای محاسبه میزان آب قابل صرفه جویی، اطلاعات کاملی از سطح زیر کشت هر یک از محصولات در حوضه آبریز دریاچه ارومیه مورد نیاز می باشد. این اطلاعات از آمارهای وزارت جهاد کشاورزی بدست آمد. همچنین، جهت تخمین نیاز آبی گیاه، فرض شده است که کل نیاز آبی گیاه، برابر با تبخیر و تعرق پتانسیل می باشد. جهت دستیابی به این اطلاعات، نرم افزار NETWAT مورد استفاده قرار گرفت. این نرم افزار

^{۳۳} Inverse Distance Weighting

اطلاعات مربوط به تبخیر و تعرق پتانسیل محصولات زراعی و باغی مختلف در دشت های مختلف کشور را با استفاده از اطلاعات میدانی و داده های سازمان هواشناسی محاسبه و ارائه می نماید.

میزان مصارف حوضه آبریز ارومیه نیز با استفاده از نقشه های نرخ تبخیر و تعرق واقعی در سطح حوضه برآورد شده است. لذا، با در نظر گرفتن دشت هایی که عمده مصرف کشاورزی حوضه آبریز ارومیه را دارا هستند (دشت میان دو آب، دشت ارومیه، منطقه زراعی سراب و منطقه زراعی نقده و اشنویه)، میزان حجم آب مصرف شده در طول سال ۲۰۱۰ میلادی و برای هر کدام از این مناطق مورد محاسبه قرار گرفت.

بخشی از نیاز آبی گیاه توسط بارش باران تأمین می شود. در نتیجه، قبل از تعیین میزان آبیاری مورد نیاز گیاه، باید رطوبت حاصل از بارش باران در محیط خاک ریشه گیاه محاسبه بشود. آن مقدار بارندگی که برای تأمین نیاز آبی گیاه، مفید واقع می گردد، باران مؤثر نامیده می شود. به عبارت بهتر، پس از حذف رواناب و نفوذ آب به آب زیرزمینی، آن بخش از بارش باران که در خاک ذخیره می شود و در دسترس گیاه قرار می گیرد، بارش مؤثر نامیده می شود.

در ادامه، با محاسبه میزان بارش مؤثر در طول دوره رشد گیاهان (که برای اغلب محصولات حوضه، این دوره بین ماه های آوریل تا اکتبر است) در سال ۲۰۱۰ میلادی و در هر یک از مناطق اشاره شده، حجمی از نیاز آبی گیاهان را که توسط بارش مؤثر تأمین شده است، مورد محاسبه قرار گرفت. به عبارت دیگر، در گام اول با محاسبه حجم بارش مؤثر و کم کردن آن از حجم نیاز آبی گیاه، حجم آبیاری مورد نیاز گیاهان برآورد گردید. همچنین، با کاستن حجم بارش مؤثر از حجم آب مصرف شده، حجم آبیاری اعمال شده نیز مورد محاسبه قرار گرفت. در نهایت، با در اختیار داشتن حجم آبیاری مورد نیاز و حجم آبیاری اعمال شده، میزان حجم آب قابل صرفه جویی برای هر یک از این مناطق، مورد تخمین قرار گرفت.

در این مطالعه، با توجه به توصیه FAO، میزان بارش مؤثر به صورت متوسط به میزان $0/69$ از کل بارش باران برآورد می شود (Bos et al. 2008).

لازم به ذکر است که در محاسبات فوق، فرض بر این است که نیاز آبی گیاه یک بار برابر با full ET و بار دیگر برابر با 80% در صد ET بوده و میزان صرفه جویی برآورد شده، بدون اعمال هیچ گونه سیاست های کم آبیاری می باشد (به جدول ۱۲ مراجعه شود).

۴-۵- داده‌های مورد استفاده در الگوریتم بیان انرژی

جهت به کارگیری الگوریتم SEBAL اصلاح شده با اثر شیب، به طور کلی از دو نوع داده استفاده شده است که شامل داده‌های زمینی و داده‌های ماهواره‌ای می‌باشند. در ادامه، هر یک از این نوع داده‌ها به تفکیک مورد بررسی و توضیح بیشتر قرار خواهند گرفت.

۴-۵-۱- داده‌های زمینی

استفاده از داده‌های ماهواره‌ای همواره مستلزم وجود داده‌های زمینی است. گاهی این داده‌ها خود خلأ داده‌های ماهواره‌ای در الگوریتم‌ها را پر می‌کنند و گاهی نیز جهت اعتبار سنجی داده‌ها و نتایج به دست آمده از تصاویر ماهواره‌ای استفاده می‌شوند. داده‌های زمینی مورد استفاده در این مطالعه شامل داده‌های هواشناسی ایستگاه‌های سینوپتیک^{۲۴} و اطلاعات لایسیمتر می‌باشند. داده‌هایی که از اطلاعات ایستگاه‌های سینوپتیک مورد استفاده قرار گرفته‌اند عبارت‌اند از: دمای روزانه کمینه، بیشینه و متوسط هوا (درجه سانتی‌گراد)، سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری (Knot) که در محاسبات به ارتفاع ۲ متری تبدیل گردید، فشار بخار (میلی بار)، فشار هوا (میلی بار)، دمای عمق ۵ سانتی‌متری خاک (سانتی‌گراد)، رطوبت نسبی (درصد) و تعداد ساعات آفتابی (ساعت).

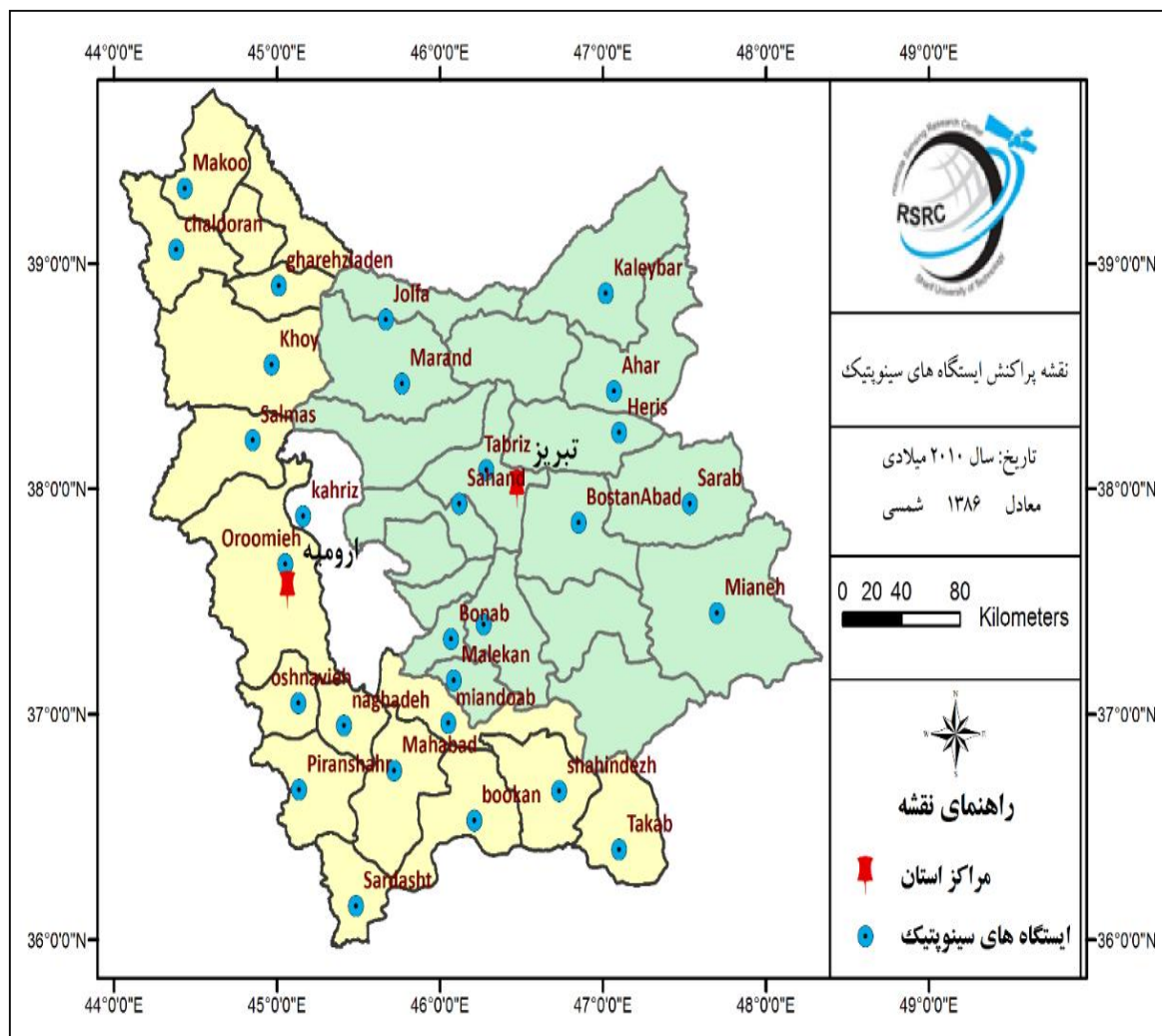
در حوضه آبریز دریاچه ارومیه، تاکنون ۴ ایستگاه لایسیمتری احداث گردیده است که از این میان دو ایستگاه با نام‌های کهریز و ارومیه در آذربایجان غربی و دو ایستگاه با نام‌های تبریز و عجب‌شیر در آذربایجان شرقی قرار دارند. با وجود مکاتبات فراوان جهت دریافت اطلاعات ایستگاه‌ها، تنها بخشی از داده‌های لایسیمتری ایستگاه تبریز در اختیار قرار داده شد که به منظور ارزیابی دقت نتایج نرخ تبخیر و تعرق واقعی به دست آمده از روش SEBAL، مورد استفاده قرار گرفت. ایستگاه تبریز در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه تبریز قرار دارد و مجهز به دستگاه لایسیمتر تفاضلی و دستگاه‌های اندازه‌گیری پارامترهای هواشناسی است. این مزرعه در نزدیکی شهر تبریز، در قسمت شرقی حوضه دریاچه ارومیه و در ارتفاع ۱۶۷۰ متری از سطح دریا قرار گرفته است و مختصات جغرافیایی آن ۴۶ درجه و ۲ دقیقه و ۲۶ ثانیه شرقی و ۳۸ درجه و ۱ دقیقه و ۱۹ ثانیه شمالی است.

^{۲۴} Synoptic

۴-۵-۲- داده‌های ایستگاهی جهت محاسبات بارش

➤ ایستگاه‌های سینوپتیک

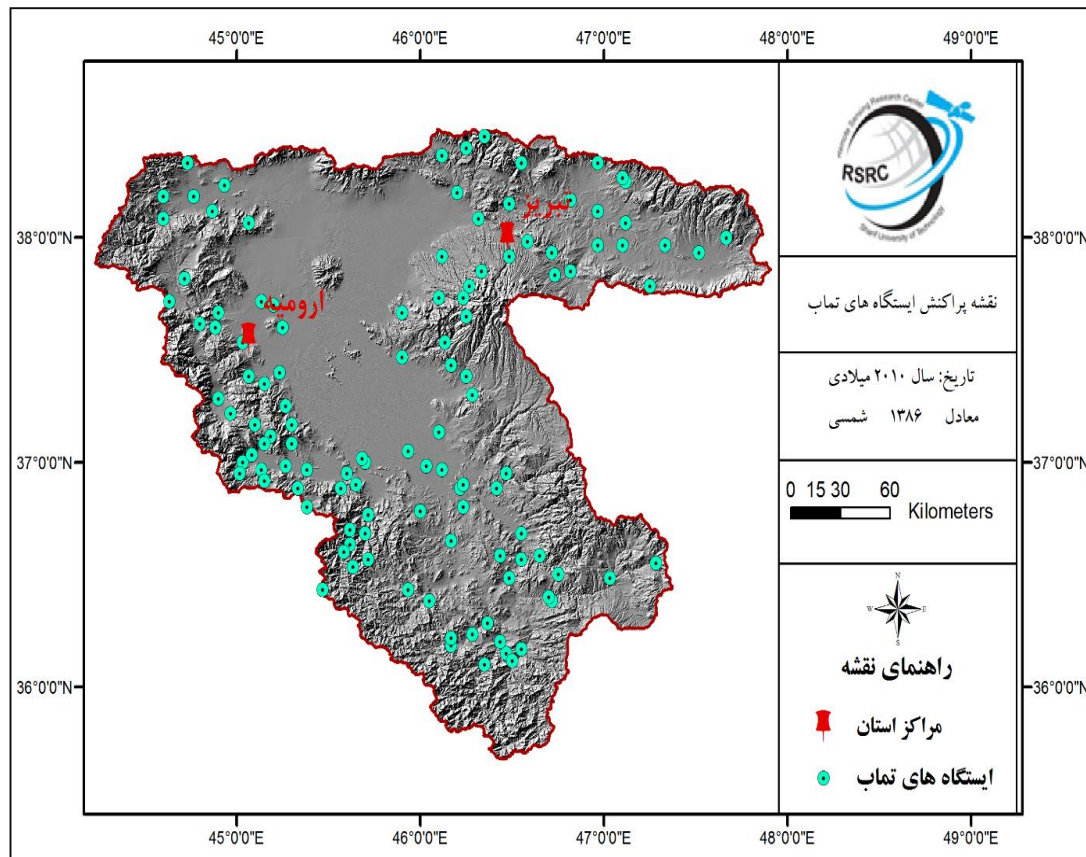
آمار بارش ماهانه مربوط به ۲۹ ایستگاه سینوپتیک واقع در استان‌های آذربایجان شرقی و آذربایجان غربی از سایت سازمان هواشناسی (<http://www.irimo.ir>) دریافت گردید. شکل ۷ نام و موقعیت ایستگاه‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد.



شکل ۷- اسامی و موقعیت ایستگاه‌های سینوپتیک استان‌های آذربایجان شرقی و غربی مورد استفاده برای محاسبات بارش

➤ ایستگاه‌های وزارت نیرو

آمار مربوط به ۱۱۰ ایستگاه مجهز به ثبت باران در حوضه آبریز ارومیه مربوط به سال‌های ۱۳۸۸ و ۱۳۸۹ شمسی از شرکت منابع آب ایران (وابسته به وزارت نیرو) دریافت گردید. شکل ۸ پراکنش این ایستگاه‌ها را در سطح حوضه آبریز نشان می‌دهد.



شکل ۸- پراکندگی ایستگاه‌های باران‌سنجی وزارت نیرو در سطح حوضه آبریز دریاچه ارومیه

۴-۵-۳- داده‌های ماهواره‌ای

برای تولید هر یک از ترم‌های معادله بیلان انرژی به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم از تعدادی از محصولات سنجنده MODIS در کنار داده‌های زمینی استفاده شده است. در جدول ۲ فهرستی از داده‌های دریافت شده از سایت MODIS نشان داده شده است. همچنین در این جدول، قدرت تفکیک زمانی و مکانی داده‌ها و نوع آن‌ها نیز مشخص شده است. در این گزارش رابطه‌ای برای پارامترهایی که به صورت محصول آماده استفاده شده‌اند (مانند LAI ، T_s ، $NDVI$) ارائه نشده است.

جدول ۲- داده های اولیه مورد استفاده در الگوریتم بیلان انرژی به همراه تفکیک مکانی و زمانی داده ها

توضیحات	Spatial Resolution	Time Resolution	Data type	Code	Downloaded Data
دمای سطح زمین	۱ کیلومتر	لحظه ای	رستر	MOD11L2	T _s
شاخص سطح برگ	۱ کیلومتر	۴ روزه	رستر	MCD15A3	LAI
شاخص اختلاف پوشش گیاهی نرمال شده	۱ کیلومتر	۱۶ روزه	رستر	MOD13A2	NDVI
تابش باندهای ۱ تا ۷ به جز باند ۵ که برای تخمین آلبدو استفاده می شوند	۱ کیلومتر	لحظه ای	رستر	MOD02	Reflectance(all of band)

جهت افزایش سرعت مطالعه و جلوگیری از ازدیاد حجم داده های نامناسب، در گام نخست و پیش از سفارش تصاویر، بر اساس تصاویر موجود در سایت ^{۲۵} Rapid Response، به صورت چشمی، روزهای مناسب برای برداشت تصویر انتخاب گردید. این سایت دارای تصاویری با ترکیب باند مختلف در زمان های گذر دو سکوی Terra و Aqua و برای تمامی روزهای سال است که به کمک آن ها می توان روزهای ابری و تصاویر با کیفیت پایین را شناسایی کرد و از روند محاسبات کنار گذاشت. پس از پالایش چشمی، تصاویر برای روزهای مورد نظر دانلود و فرمت آن ها با استفاده از نرم افزار HEG از HDF به Geotiff (که فرمت مناسب برای کار در محیط نرم افزار ILWIS می باشد) تبدیل گردید. همچنین با استفاده از نرم افزار هگ، عملیات تصویر کردن نقشه ها^{۲۶} به سیستم مختصات UTM و بریدن تصویر برای محدوده حوضه آبریز نیز انجام شد. در ادامه، تصاویر تبدیل فرمت شده وارد نرم افزار الویس گردید و با قرار دادن مرز حوضه آبریز و با توجه به تعداد سلول های بدون اطلاعات^{۲۷} در هر یک از آن ها، تصاویر مجدداً غربال شدند. شرایط در نظر گرفته شده برای قبول کردن هر لایه به عنوان لایه مناسب در جدول ۳ آورده شده است. در نهایت، از ۳۶۴ روز سال ۵۶ روز که توزیع آن ها در ماه های مختلف سال در جدول ۴ نشان داده شده است، برای ادامه کار انتخاب شدند.

^{۲۵} <https://earthdata.nasa.gov/data/near-real-time-data/rapid-response>

^{۲۶} Projection

^{۲۷} No data

جدول ۳- شرایط لازم برای استفاده از هر محصول در الگوریتم اصلاح شده SEBAL

شرایط	لایه ها
وجود حداقل یک تصویر در روز و یک تصویر در شب از هر یک از سکوها یا ترا یا آکوا	LST
وجود تصویر مناسب و بدون ابر در فاصله چهارروزه از تاریخ موردنظر	LAI
وجود تصویر مناسب و بدون ابر در فاصله شانزده روزه از تاریخ موردنظر	NDVI

جدول ۴- تعداد روزهای باکیفیت مناسب در فاصله ماه های مختلف سال ۲۰۱۰

روزهای پذیرفته شده برای ماهواره Aqua و Terra	
ماه	تعداد روزهای بدون ابر
آوریل	۱
می	۱
ژوئن	۱۱
جولای	۱۲
اوت	۵
سپتامبر	۶
اکتبر	۴

۴-۶- برآورد نیاز خالص آبیاری و آبیاری اعمال شده محصولات زراعی-باغی در اراضی آبی^{۲۸}

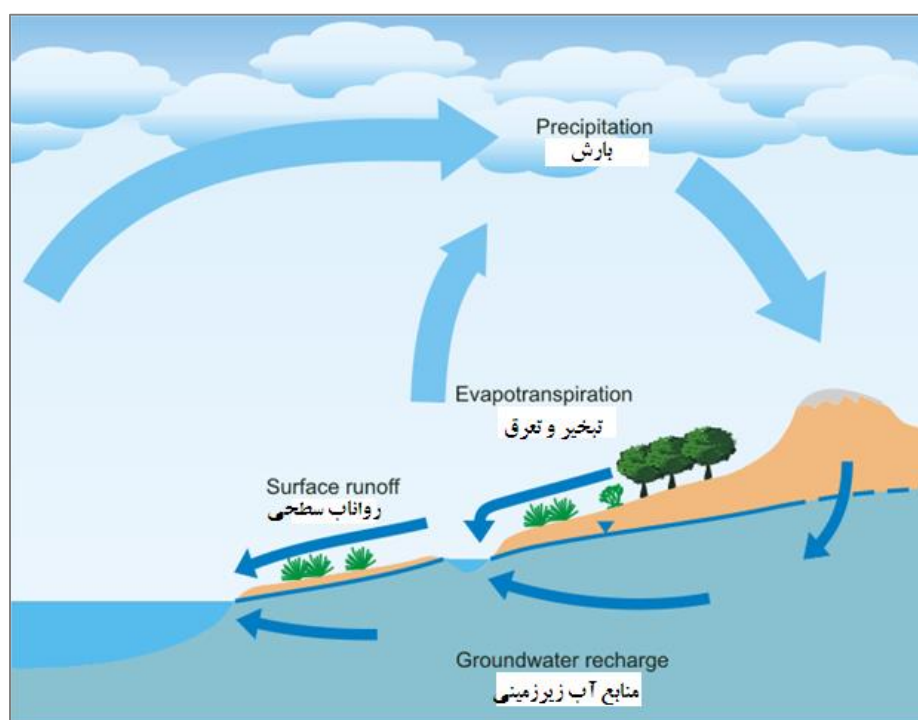
گیاه جهت تأمین میزان آب مورد نیاز خود از بارش مؤثر و آبیاری کشاورزان استفاده می نماید. میزان نیاز خالص آبیاری (میزان آبیاری مورد نیاز گیاه) برابر با اختلاف میزان بارش مؤثر و نیاز آبی گیاه است. همچنین، میزان آبیاری اعمال شده برابر با اختلاف میزان بارش مؤثر و میزان تبخیر و تعرق واقعی می باشد. این مقادیر با استفاده از معادله (۴۶) و (۴۷) محاسبه خواهند شد.

$$ET_{actual} - EP = Irr_{Applied} \quad (46)$$

$$ET_{potential} - EP = Irr_{Demand} \quad (47)$$

^{۲۸} Irrigated Land

در این روابط ET_{actual} و $ET_{potential}$ به ترتیب نرخ تبخیر و تعرق واقعی و نیاز آبی گیاه در اراضی آبی بر حسب میلی متر می باشد. همچنین ترم EP میزان بارش مؤثر روی اراضی زراعی و باغی بر حسب میلی متر است که با توجه به توصیه FAO به صورت متوسط به میزان ۰/۶۹ از کل بارش باران برآورد می شود (Bos et al. 2008). در شکل ۹ به صورت شماتیک، بیلان آب برای یک منطقه با پوشش گیاهی نشان داده شده است.



شکل ۹ - تصویر شماتیک بیلان آب یک حوضه آبریز به همراه دریاچه

۴-۷- بیلان بخار حوضه آبریز

از اهداف اصلی این مطالعه، بررسی و شناسایی مناطقی از حوضه دریاچه ارومیه است که بیشترین مقادیر نرخ تبخیر و تعرق واقعی را دارا می باشند. در واقع با توجه به روند کاهشی سطح دریاچه ارومیه در سال های گذشته، بدیهی است که مصرف آب در حوضه افزایش یافته و در مقابل، حجم آب دریاچه کاسته شده است. بیلان بخار حوضه آبریز، با تقسیم مقادیر نرخ تبخیر و تعرق واقعی حوضه بر مقدار تبخیر میانگین سطح دریاچه محاسبه می شود.

۴-۸- ارزیابی عملکرد مدل SEBAL

اگرچه ۴ ایستگاه لایسیمتر در حوضه موجود می باشد ولی در زمان ارائه گزارش، تنها داده های ۱۶ روز از ماه های آوریل، می، ژوئن و جولای ایستگاه مزرعه تحقیقاتی دانشگاه تبریز موجود بوده است. با توجه به روزها و ماه های مورد مطالعه، تنها داده های چهار تاریخ یعنی بیست و هفتم ماه می، سوم ماه ژوئن، نهم ماه جولای و سی ام ماه جولای قابل مقایسه می باشد. شاخص های آماری مورد استفاده برای بررسی عملکرد الگوریتم این مطالعه، در جدول ۵ نشان داده شده است.

جدول ۵- شاخص های عملکرد برای بررسی عملکرد الگوریتم مورد مطالعه

متغیر آماری	توضیح	معادله	مورد استفاده (مقدار مطلوب)
R ²	ضریب تعیین	$\frac{(\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(M_i - \bar{M}))^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2}$	نشان دهنده ارتباط خطی (+۱ یا -۱)
MBE	میانگین خطای اریب	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - M_i)$	شاخص تعیین تخمین بیش برآورد یا کم برآورد (صفر)
RMSE	مجذور میانگین مربع خطا	$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (M_i - O_i)^2}$	شاخص مقایسه خطای پیش بینی یک مدل (صفر)
RMSE (%)	درصد مجذور میانگین مربع خطا	$\frac{RMSE}{\frac{\sum_{i=1}^n O_i}{n}} \times 100$	بیان RMSE به درصد (صفر)

در معادلات بالا، M_i مقدار تبخیر و تعرق تخمین زده شده توسط مدل، O_i مقدار واقعی تبخیر و تعرق ثبت شده توسط لایسیمتر، \bar{M} میانگین مقادیر تخمینی و \bar{O} میانگین مقادیر واقعی است.

۵- نتایج

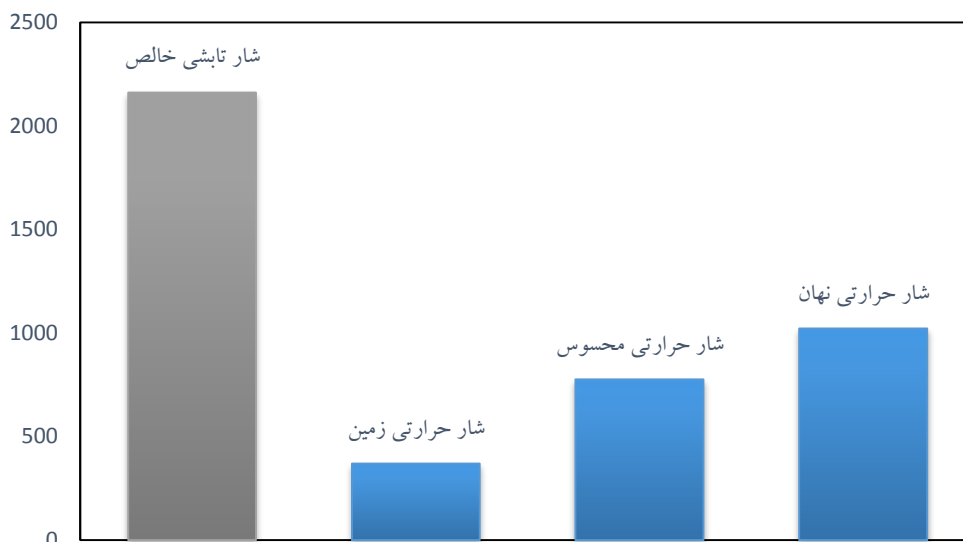
در این فصل، نتایج پژوهش بر اساس روش SEBAL اصلاح شده به همراه تحلیل نتایج در غالب بخش های مختلف ارائه خواهد شد.

۵-۱- تحلیل تغییرات زمانی-مکانی شارهای انرژی

در مطالعه نرخ تبخیر و تعرق واقعی حوضه آبریز دریاچه ارومیه به روش بیلان انرژی، سه ترم عمده تأثیر گذارند. این سه ترم عبارتند از:

- شار تشعشع خالص در سطح زمین (R_n)
- شار گرمایی زمین (G)
- شار حرارتی محسوس (H)

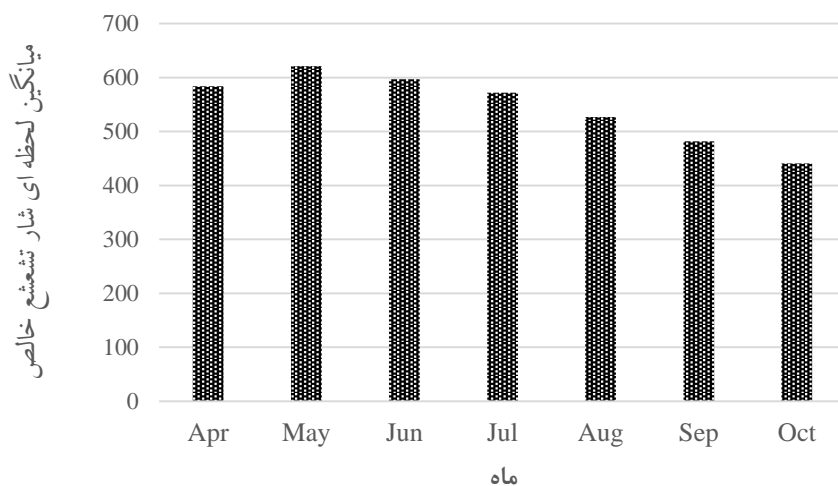
هر یک از این ترمها بر اساس روابط توضیح داده شده در بخش سوم به صورت جداگانه محاسبه شده و در نهایت، ارتفاع تبخیر و تعرق واقعی بر اساس رابطه (۱) تخمین زده شده است. در شکل ۱۰ سهم هر یک از این شارهای انرژی در محاسبه ارتفاع تبخیر و تعرق واقعی حوضه دریاچه ارومیه به صورت تجمعی در هفت ماه مورد مطالعه (ماه آوریل تا اکتبر) نشان داده شده است. همان طور که در این نمودار مشخص است، شار گرمایی زمین کمترین مقدار را در این محاسبه داشته است. با توجه به ارقام محاسبه شده، بیش از یک-سوم از شار انرژی تشعشع خالص که به سطح زمین می رسد، تحت عنوان شار حرارتی محسوس ذخیره و کمی بیشتر از یک-ششم از آن در زمین تحت عنوان شار گرمایی زمین ذخیره می شود.



شکل ۱۰- میزان شارهای انرژی تجمعی هفت ماه مورد مطالعه حوضه آبریز دریاچه ارومیه در سال ۲۰۱۰ ($W.m^{-2}$)

در ادامه، با استفاده از روند تغییرات شارهای انرژی طی هفت ماه آوریل تا اکتبر سال ۲۰۱۰ میلادی (معادل ماه‌های فروردین تا مهر سال ۱۳۸۹ شمسی) و نقشه متوسط شارهای انرژی در این هفت ماه، تغییرات مکانی و زمانی آن‌ها مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است.

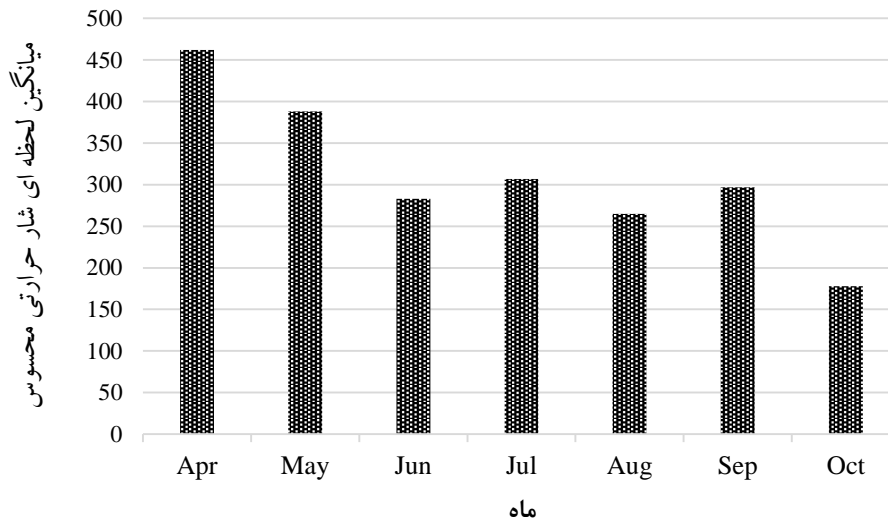
در شکل ۱۱ تغییرات زمانی میانگین شار تشعشع خالص در سطح زمین طی هفت ماه آوریل تا اکتبر بر حسب وات بر مترمربع نشان داده شده است. روند تغییرات آن از ماه آوریل تا ماه می افزایش و بعد از آن تا اکتبر با شیب تقریباً ثابت و ملایمی کاهش می‌یابد. با توجه به تأثیر عمده تغییرات شار تشعشع خالص در مقادیر کلی سالانه معادله بیلان انرژی، برآورد دقیق‌تر این ترم در محاسبه مقادیر نهایی نرخ تبخیر و تعرق واقعی حوضه، تأثیر قابل توجهی خواهد داشت. هم‌چنین مطابق شکل ۱۱ بیشترین مقدار تابش خالص رسیده به سطح، در ماه می اتفاق می‌افتد. با توجه به معادلات ارائه شده در بخش ۴-۱-۳ و ۴-۱-۴، دمای سطح و هوا با توجه به داشتن توان چهارم در معادلات، بیشترین تأثیر را در محاسبه R_n خواهند داشت.



شکل ۱۱- تغییرات میانگین شار تشعشع خالص لحظه‌ای در روزهای مورد محاسبه طی هفت ماه مورد مطالعه حوضه آبریز دریاچه ارومیه در سال ۲۰۱۰ ($W.m^{-2}$)

در شکل ۱۲ تغییرات زمانی میانگین شار حرارتی محسوس طی هفت ماه آوریل تا اکتبر بر حسب وات بر مترمربع نشان داده شده است. برخلاف روند تغییرات شار تابش مخصوص و حتی روند تغییرات شار گرمای زمین که در ادامه مورد بررسی قرار گرفته است، روند تغییرات به صورت زنگوله‌ای نمی‌باشد. مقدار بیشینه شار تابش مخصوص در ماه آوریل دیده می‌شود. با توجه به روابط ارائه شده در بخش ۴-۱-۶، مقدار شار

حرارتی با توجه به تغییرات ناچیز گرمای ویژه و چگالی هوا، به صورت عمده ناشی از تقسیم دو ترم dT و I_{ah} می باشد که برهم کنش این دو ترم با استفاده از روابط پیچیده تر موجود در روش تکراری (توصیه شده در SEBAL) محاسبه شده است. به صورت کلی با توجه به نقش تغییرات دما و تأثیر روزهای آفتابی می توان انتظار داشت که عمده این تغییرات تابع عملکرد این دو بر یکدیگر می باشد.



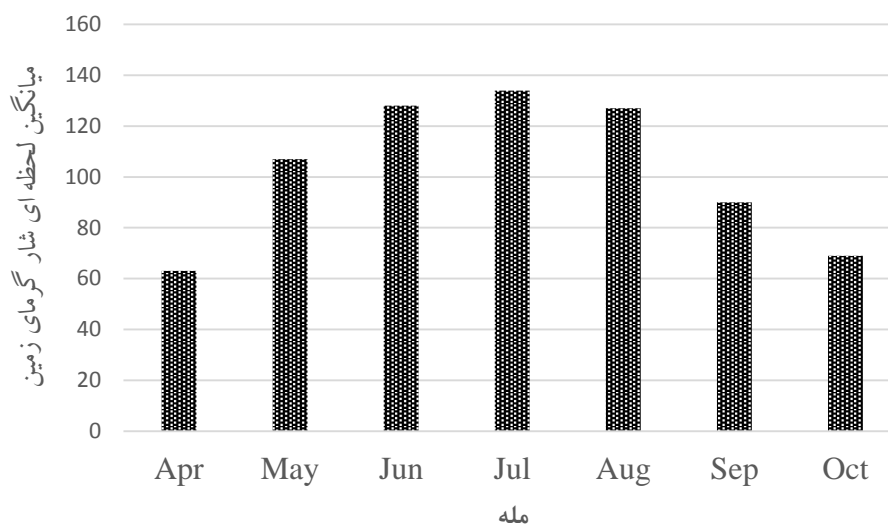
شکل ۱۲- تغییرات میانگین شار حرارتی محسوس لحظه ای در روزهای مورد محاسبه طی هفت ماه مورد مطالعه حوضه آبریز دریاچه ارومیه در سال ۲۰۱۰ (W.m⁻²)

در شکل ۱۳ تغییرات زمانی میانگین شار گرمایی زمین طی هفت ماه آوریل تا اکتبر بر حسب وات بر مترمربع نشان داده شده است. با توجه به این شکل، روند تغییرات میانگین ماهانه تقریباً مشابه تغییرات شار تابش خالص و نرخ تبخیر و تعرق واقعی می باشد. با توجه به رابطه (۱۷) مقادیر شار گرمایی زمین تابع پارامترهای زیر است:

- دمای سطح
- آلبدو
- شاخص پوشش گیاهی (NDVI)
- شار تابش خالص

با توجه به محدوده تغییرات اندک آلبدو و شاخص پوشش گیاهی می توان از تأثیر گذاری عمده این ترمها در مقادیر شار تابش گرمای زمین صرف نظر کرد. بنابراین، تشابه روند تغییرات شار تابش گرمایی زمین

و شار تابش خالص قابل پیش بینی بوده است. با توجه به مقادیر میانگین شار تابش گرمای زمین به دست آمده و مقادیر شارهای تابش خالص و شار حرارتی نشان داده شده در شکل ۱۰، می توان بیان داشت که در میان ترم های شارهای بیلان انرژی کمترین تأثیر را ترم شار گرمای زمین داراست؛ اما با توجه به نسبت مقادیر می توان نتیجه گرفت که نه در مقیاس ماهانه و نه به صورت تجمعی فصلی و سالانه، نمی توان از اثر ترم شار گرمای زمین صرف نظر کرد و رفتار این ترم با وجود همبستگی فراوان به ترم شار تابش خالص، از استقلال کافی جهت تأثیر کلی بر مقادیر نرخ تبخیر و تعرق واقعی حوضه برخوردار است.

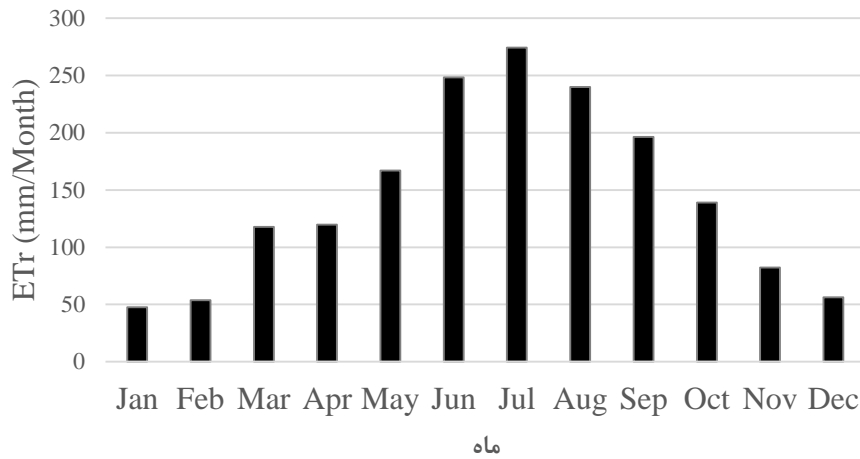


شکل ۱۳- تغییرات میانگین شار گرمای زمین لحظه ای در روزهای مورد محاسبه طی هفت ماه مورد مطالعه حوضه آبریز دریاچه ارومیه در سال ۲۰۱۰ (W.m⁻²)

۵-۲- تبخیر و تعرق مرجع

تبخیر و تعرق مرجع (ET_r) که گاهی اوقات به اشتباه به عنوان پتانسیل ET اشاره می شود، نماینده ای است از تقاضای زیست محیطی برای تبخیر و تعرق و نشان دهنده نرخ تبخیر و تعرق از گیاه سبز مرجع (چمن) که به صورت کاملاً یکنواخت (هم در سطح و هم در ارتفاع) و با وضعیت آب کافی در پروفیل خاک در یک زمین رشد نموده است. تبخیر و تعرق مرجع در واقع بازتابی از انرژی موجود برای تبخیر آب است؛ بنابراین تغییرات زمانی آن بیانگر تغییرات بازتاب انرژی موجود برای تبخیر آب در منطقه به شمار می رود. در شکل ۱۴ تغییرات ماهانه تبخیر و تعرق مرجع با استفاده از داده های هواشناسی ایستگاه ارومیه طی دوازده ماه سال ۲۰۱۰ میلادی ارائه شده است. همان طور که در این شکل نشان داده شده است، تغییرات به صورت کلی به

شکل زنگوله‌ای است؛ به صورتی که بیشترین مقدار تبخیر و تعرق مرجع در ماه ژوئیه با ۲۷۴ میلی‌متر و کمترین مقدار در ماه ژانویه با ۴۸ میلی‌متر برآورد شده است.

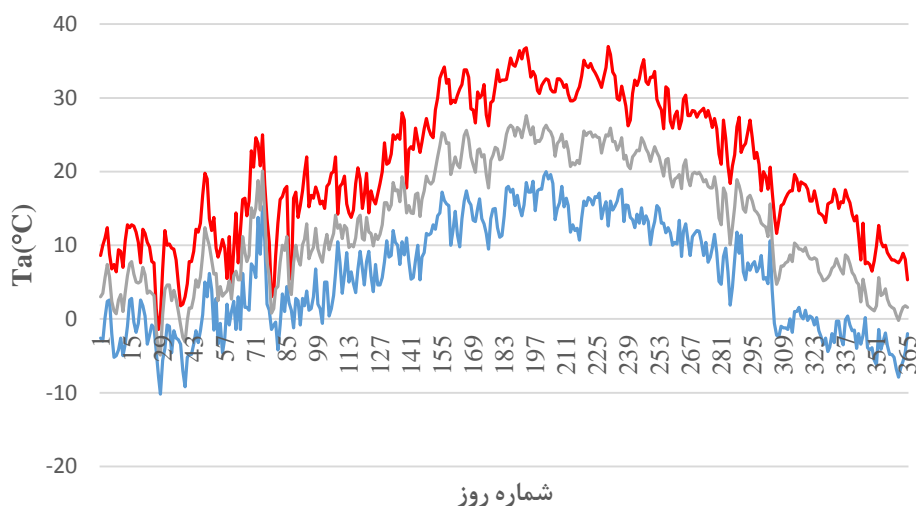


شکل ۱۴- تغییرات زمانی تبخیر و تعرق مرجع با استفاده از داده‌های ایستگاه ارومیه در حوضه آبریز دریاچه ارومیه در سال میلادی ۲۰۱۰ (میلی‌متر)

جهت بررسی تغییرات زمانی مقادیر تبخیر و تعرق مرجع طی هفت ماه مورد مطالعه در سال ۲۰۱۰ میلادی، تغییرات پارامترهای اقلیمی تأثیرگذار (دمای هوا، سرعت باد، درصد رطوبت، ساعات آفتابی) در محاسبه تبخیر و تعرق مرجع مورد بررسی قرار گرفته است.

۵-۲-۱- دمای هوا

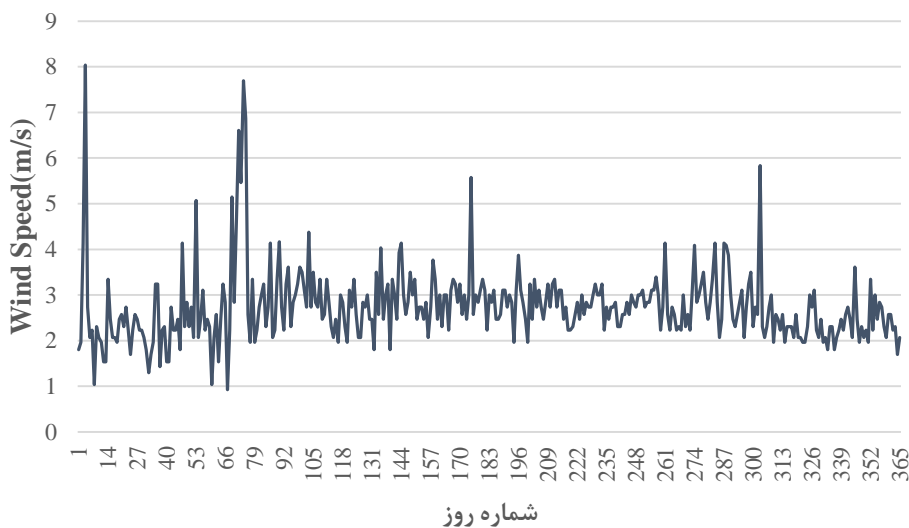
شکل ۱۵ تغییرات بیشینه، کمینه و متوسط دمای هوا در محل ایستگاه ارومیه را نمایش می‌دهد. بیشینه دمای هوا ۳۶ درجه سانتی‌گراد بوده و مربوط به روز ۱۹ ماه آگوست و کمینه دمای هوا برابر ۱۰/۲- درجه سانتی‌گراد و متعلق به ۲۷ ژانویه می‌باشد. متوسط دمای هوا در طول سال نیز برابر با ۱۳/۴ درجه سانتی‌گراد می‌باشد.



شکل ۱۵- تغییرات بیشینه، کمینه و متوسط دمای هوا در محل ایستگاه ارومیه

۵-۲-۲- سرعت باد

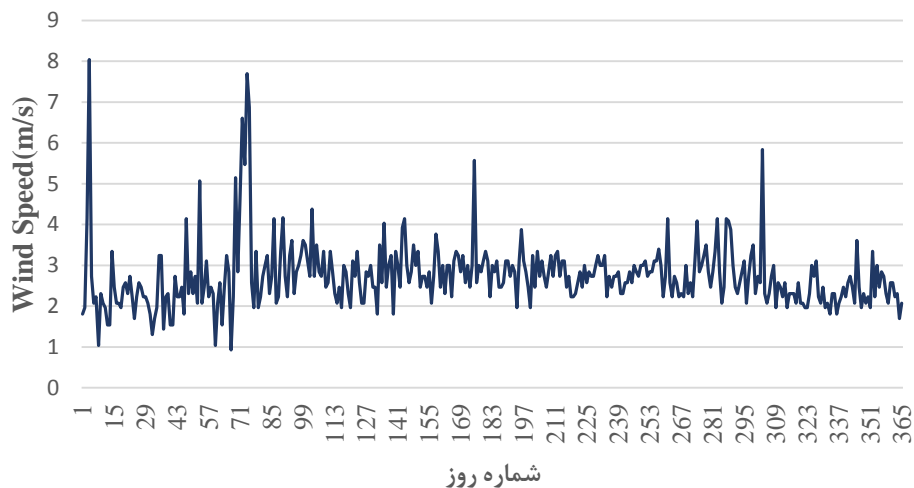
در شکل ۱۶ تغییرات سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین (ثبت شده در ایستگاه ارومیه طی سال ۲۰۱۰ میلادی) نشان داده شده است. بیشینه سرعت باد ثبت شده، معادل ۸ متر بر ثانیه بوده و مربوط به روز چهارم ماه ژانویه می باشد. میانگین سرعت باد در منطقه نیز ۲/۷۵ متر بر ثانیه می باشد.



شکل ۱۶- تغییرات متوسط روزانه سرعت باد در محل ایستگاه ارومیه

۵-۲-۳- درصد رطوبت

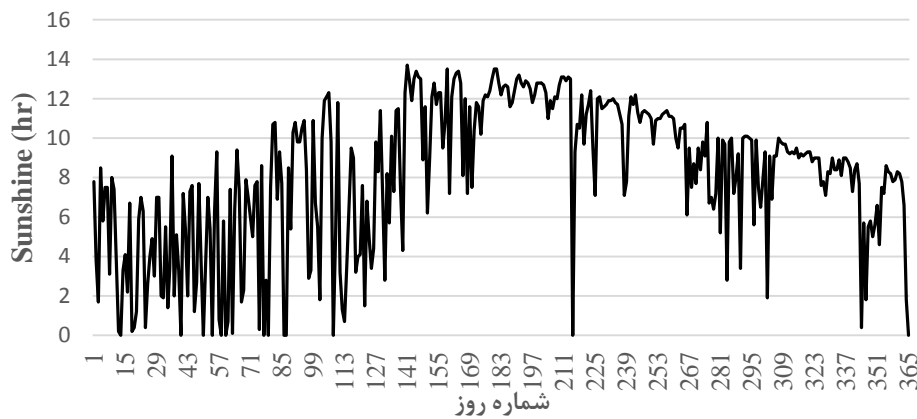
میانگین روزانه درصد رطوبت در محل ایستگاه ارومیه در شکل ۱۷ آمده است. با توجه به این شکل، درصد رطوبت در ۴ ماه ابتدای سال میلادی به طور متوسط ۳۰ درصد بیش از ۸ ماه انتهایی سال میلادی می باشد. بیشینه درصد رطوبت معادل ۹۷٪ بوده و مربوط به روز اول ماه مارس می باشد و کمینه آن نیز معادل ۲۷٪ بوده و به روز پانزدهم همین ماه تعلق دارد. متوسط درصد رطوبت در محل این ایستگاه معادل ۵۷٪ می باشد.



شکل ۱۷- تغییرات متوسط روزانه درصد رطوبت در ایستگاه ارومیه

۵-۲-۴- ساعات آفتابی

شکل ۱۸، تغییرات تعداد ساعات آفتابی در روزهای مختلف سال ۲۰۱۰ میلادی را نمایش می دهد. میانگین ساعات آفتابی در این سال معادل ۸/۲ ساعت در روز بوده و بیشینه مقدار آن ۱۳/۴ ساعت و کمترین مقدار آن نیز صفر ساعت می باشد.



شکل ۱۸- تغییرات تعداد ساعات آفتابی در روز در سال ۲۰۱۰ میلادی در محل ایستگاه ارومیه

۵-۳- نرخ تبخیر و تعرق واقعی روزانه

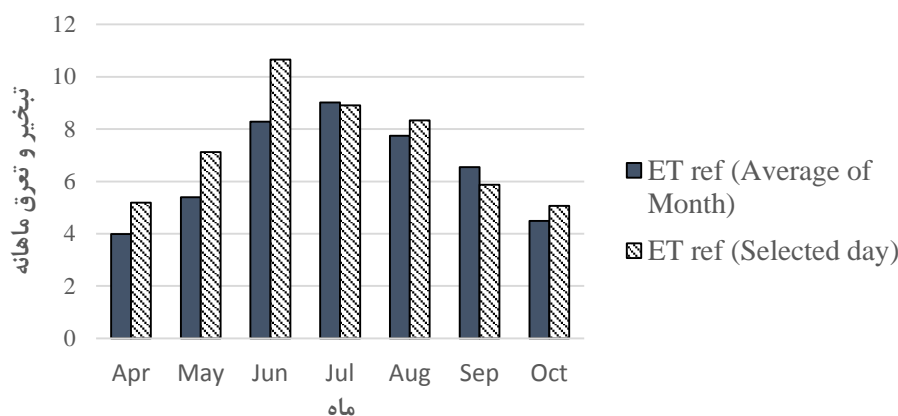
در گام زمانی روزانه، در هر ماه و با توجه به محدودیت تعداد تصاویر مناسب جهت تخمین ارتفاع تبخیر و تعرق واقعی، تلاش شد تا در هر ماه حداقل یک تصویر مناسب برای محاسبه تبخیر و تعرق واقعی انتخاب شود. در جدول ۶، تاریخ روز مورد بررسی در هر ماه از هفت ماه مورد بررسی در سال ۲۰۱۰ میلادی به تفکیک مشخص شده است. به عنوان مثال، بیست و هفتمین روز از ماه می برای محاسبه تبخیر و تعرق واقعی در این ماه مورد استفاده قرار گرفته است.

جدول ۶- تاریخ روز مورد مطالعه در هر ماه مورد بررسی در سال ۲۰۱۰ جهت محاسبه ارتفاع تبخیر و تعرق واقعی حوضه

روز ماه	ماه
۳	آوریل
۲۷	می
۳، ۱۴، ۲۹	ژوئن
۳۰، ۹، ۳	جولای
۲۹، ۲، ۲۰	اوت
۹، ۲۱	اکتبر

محاسبه نقشه های ارتفاع تبخیر و تعرق واقعی در ۱۳ روز مورد بررسی طبق الگوریتم SEBAL اصلاح شده صورت گرفته است. هم چنین برای تبدیل مقادیر لحظه ای به روزانه و ماهانه، از ET_r محاسبه شده در کل روزهای ماه استفاده شده است. بدین منظور از مقادیر R_n و G محاسبه شده بر پایه داده های ایستگاه سینوپتیک

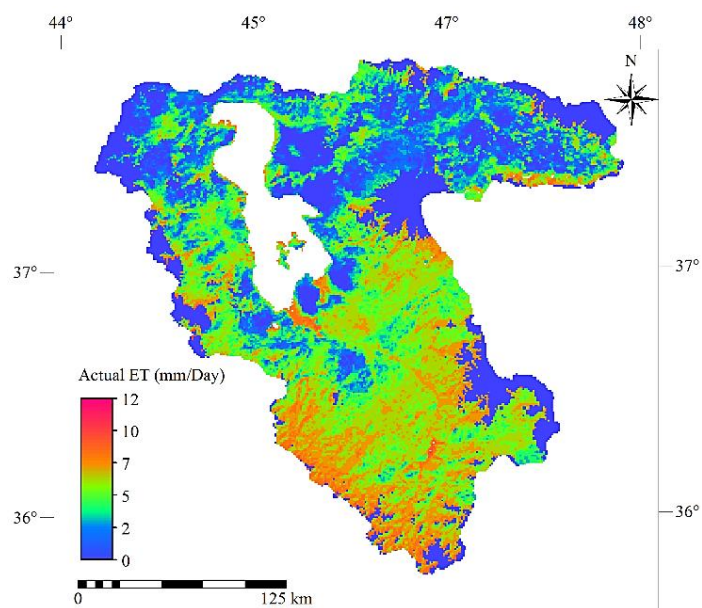
ارومیه استفاده شده است. بررسی نسبت ET_r روز انتخاب شده در هر ماه نسبت به سایر ET_r های روزهای دیگر یکی از مواردی است که در این مطالعه صورت گرفته است. در نمودار ارائه شده در شکل ۱۹، نسبت تبخیر و تعرق مرجع محاسبه شده با استفاده از داده های ایستگاه ارومیه در روزهای مورد بررسی نسبت به میانگین دوره ای که معرف آن می باشد (کل ماه) نشان داده شده است. در تمامی روزها به غیر از روز انتخاب شده برای ماه سپتامبر، مقادیر میانگین ارتفاع تبخیر و تعرق واقعی روز مورد محاسبه، بیشتر از تبخیر و تعرق مرجع میانگین آن ماه می باشند.



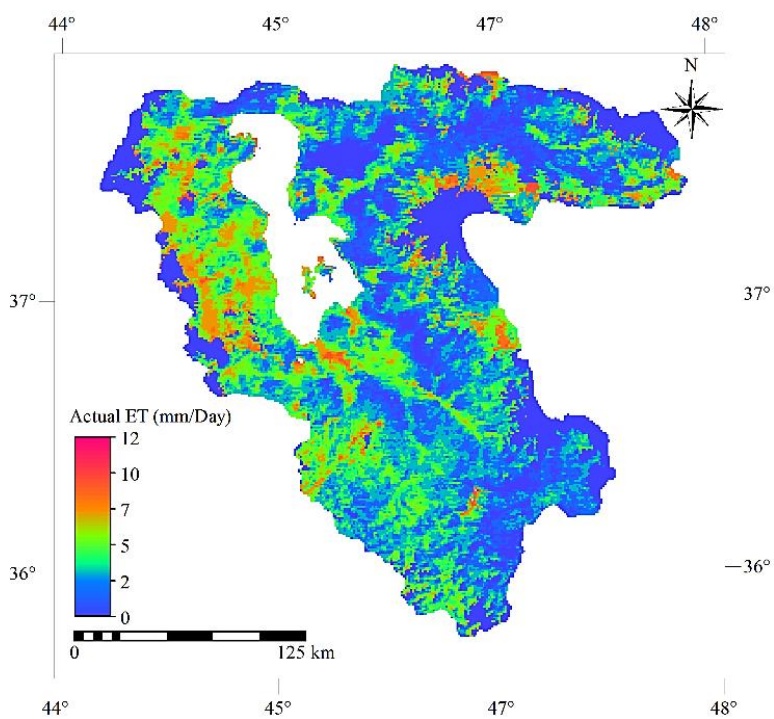
شکل ۱۹- تغییرات تبخیر و تعرق مرجع ۲۰۱۰ محاسبه شده برای ایستگاه ارومیه بر حسب میلی متر (میانگین ماهانه و روز مورد محاسبه)

تغییرات مکانی ارتفاع تبخیر و تعرق واقعی در کل حوضه آبریز دریاچه ارومیه از دیگر اهداف بررسی نقشه های روزانه نرخ تبخیر و تعرق واقعی می باشد. بدین منظور، نقشه های ارتفاع تبخیر و تعرق واقعی متوسط روزانه حوضه در هفت روز از هفت ماه مورد بررسی (مطابق با جدول ۶) در شکل ۲۰ نشان داده شده است. به صورت کلی الگوی مکانی مناطق قرمز و نارنجی رنگ مطابق با پوشش گیاهی منطقه می باشد. در صورت تفکیک پوشش گیاهی مناطق حوضه به دو بخش اراضی کشاورزی (شامل اراضی باغی و زراعی) و اراضی دیم، همان طور که در تمامی نقشه های روزانه ارتفاع تبخیر و تعرق واقعی مشاهده می شود و انتظار می رفت، اراضی کشاورزی واقع در دشت ارومیه و شهرهای اطراف آن، حاشیه سیمینه رود و زرينه رود، مناطق سیلوانه در غرب و قسمت های شرقی چون سراب، بیشترین مقادیر ارتفاع تبخیر و تعرق واقعی را نسبت به سایر نقاط منطقه حوضه آبریز دریاچه ارومیه دارا می باشند. در ادامه و در بخش تغییرات مکانی ماهانه ارتفاع تبخیر و تعرق واقعی نواحی بیشینه مورد بررسی جامع تری قرار گرفته اند.

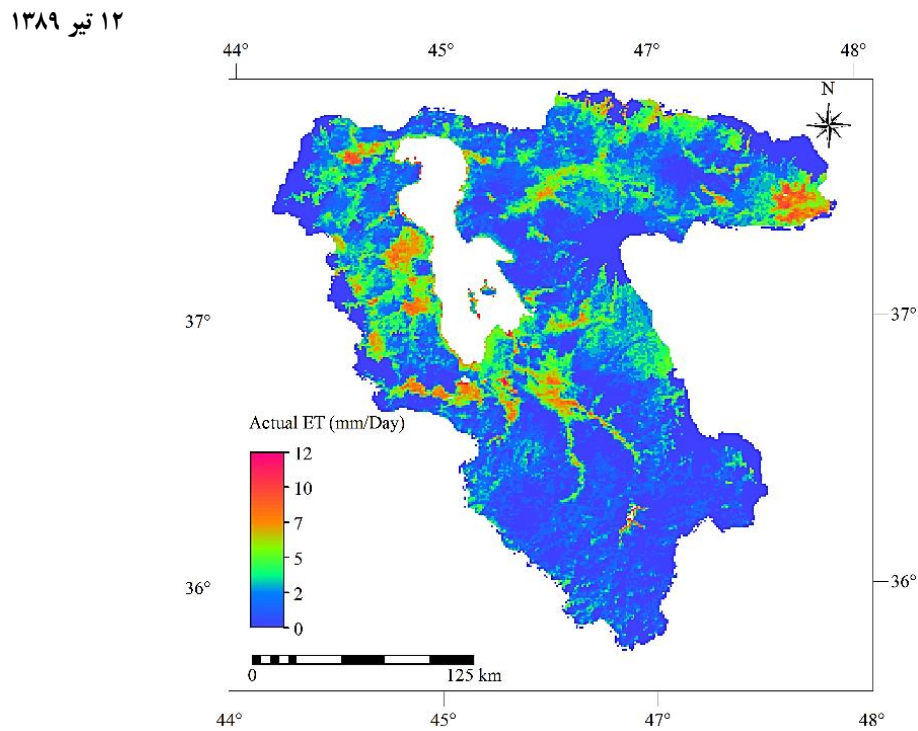
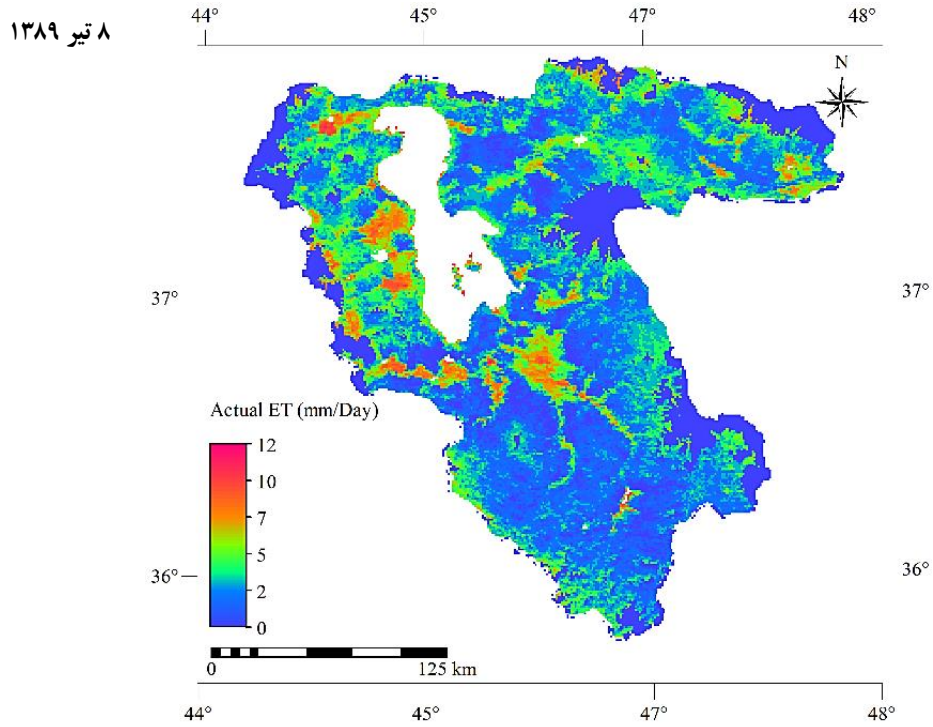
۱۴ فروردین ۱۳۸۹



۶ خرداد ۱۳۸۹

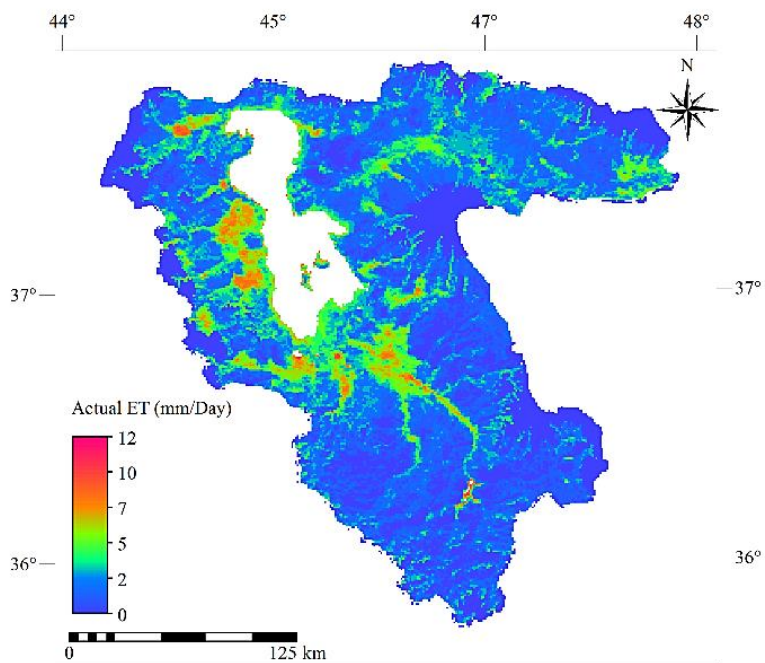


شکل ۲۰- توزیع مکانی تبخیر و تعرق واقعی روزانه در حوضه دریاچه ارومیه در تاریخ ۶های تصاویر دریافتی در سال ۲۰۱۰ میلادی (mm. day⁻¹)

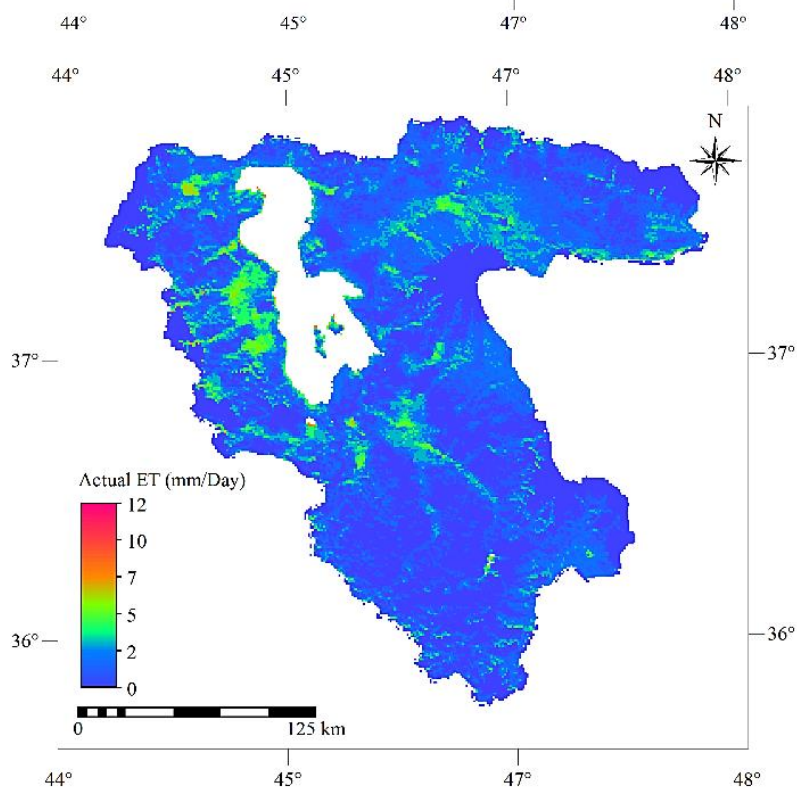


شکل ۲۰- (ادامه) توزیع مکانی تبخیر و تعرق واقعی روزانه در حوضه دریاچه ارومیه در تاریخ های تصاویر دریافتی در سال ۲۰۱۰ میلادی (mm. day^{-1})

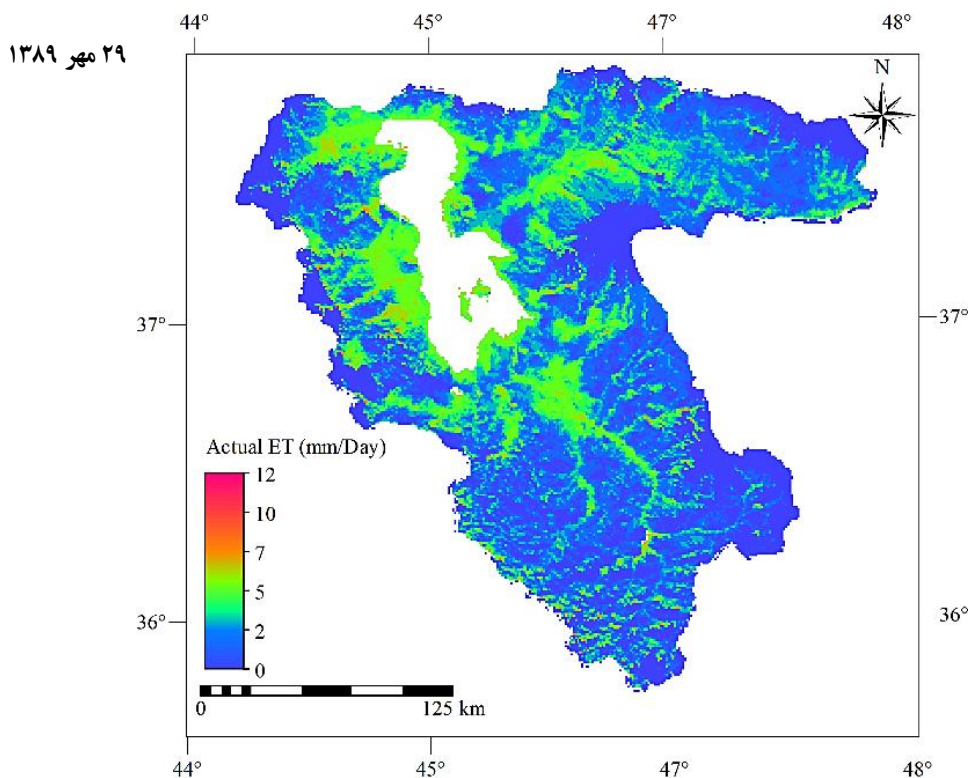
۲۹ مرداد ۱۳۸۹



۲۶ شهریور ۱۳۸۹



شکل ۲۰- (ادامه) توزیع مکانی تبخیر و تعرق واقعی روزانه در حوضه دریاچه ارومیه در تاریخ های تصاویر دریافتی در سال ۲۰۱۰ میلادی (mm. day^{-1})



شکل ۲۰ - (ادامه) توزیع مکانی تبخیر و تعرق واقعی روزانه در حوضه دریاچه ارومیه در تاریخ های تصاویر دریافتی در سال ۲۰۱۰ میلادی (mm. day^{-1})

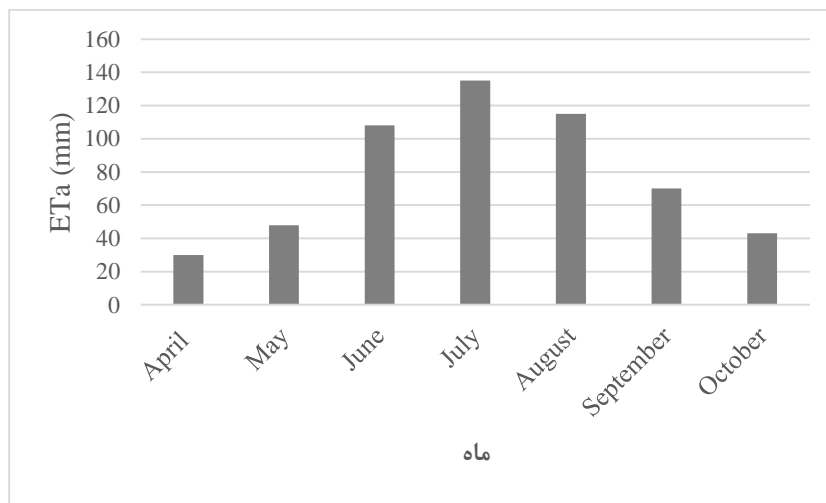
۵-۴- نرخ تبخیر و تعرق واقعی ماهانه

در گام زمانی ماهانه، برای تولید نقشه های ارتفاع تبخیر و تعرق واقعی با استفاده از روش SEBAL، مقادیر ET_r برای تمامی روزها در محل ایستگاه ارومیه و با استفاده از داده های این ایستگاه محاسبه گردید. با استفاده از روش محاسبه ای SEBAL و استفاده از نقشه های روزانه و داده های ET_r ، نقشه های ماهانه محاسبه شده است. در ادامه با ارائه مقادیر متوسط ماهانه حوضه به بررسی نتایج به تفکیک مکانی و زمانی پرداخته خواهد شد.

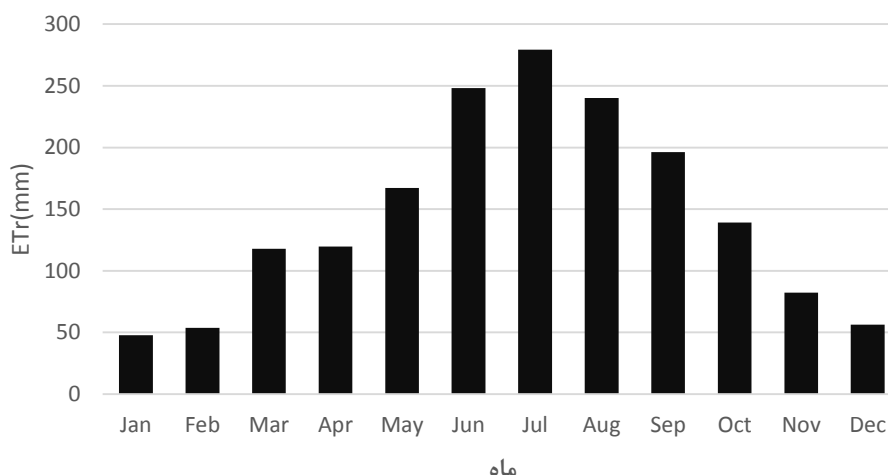
جهت بررسی زمانی مقادیر ارتفاع تبخیر و تعرق واقعی حوضه آبریز دریاچه ارومیه، مقادیر متوسط تجمعی ماهانه طی هفت ماه مورد بررسی فروردین تا آبان به صورت نمودار در شکل ۲۱ نشان داده شده است. با توجه به مقادیر به دست آمده، بیشترین نرخ تبخیر و تعرق واقعی، در ماه جولای رخ داده است. روند تغییرات مشابه تغییرات R_n و G (شکل ۱۱ و شکل ۱۳) می باشد و به تدریج و با شیب ملایم از ماه ژوئیه تا اکتبر به صورت کاهشی است. نحوه تغییرات مقادیر ماهانه نرخ تبخیر و تعرق واقعی با آنچه در مورد تبخیر و تعرق مرجع رخ می دهد تطابق دارد (شکل ۲۲). به این نحو که از ابتدای سال تا ماه جولای، روندی افزایشی داشته

و پس از آن، مقادیر تبخیر و تعرق مرجع کاهش یافته تا در ماه دسامبر به کمترین مقدار می‌رسد. بیشینه مقدار مشاهده شده در ماه جولای به دلیل تبخیر و تعرق بالای صورت گرفته از اراضی مربوط به کشت آبی می‌باشد، زیرا به دلیل شرایط خاص جوی، نیاز آبی گیاه افزایش یافته و آب بیشتری را صرف تبخیر و تعرق می‌نماید. همچنین، در این ماه محصولات کشت دیم، برداشت شده و تبخیر و تعرق چندانی در این نوع اراضی وجود ندارد.

میزان تبخیر و تعرق پتانسیل با استفاده از منحنی ضریب محصولات (این ضریب طی دوره رشد گیاه متغیر بوده و به صورت میانگین کمتر از یک می‌باشد) و تبخیر و تعرق مرجع برای هر محصول قابل محاسبه است. طرف دیگر نرخ تبخیر و تعرق واقعی در بهترین شرایط برابر با تبخیر و تعرق پتانسیل می‌باشد. بنابراین، انتظار می‌رود تا نرخ تبخیر و تعرق واقعی در محل ایستگاه ارومیه اندکی کمتر از مقادیر تبخیر و تعرق مرجع باشد. البته اختلاف پیکسل نقشه‌های نرخ تبخیر و تعرق واقعی و موقعیت نقطه‌ای داده‌های ایستگاه ارومیه، منجر به خطای این مقایسه می‌شود.



شکل ۲۱- تغییرات زمانی میانگین نرخ تبخیر و تعرق واقعی اراضی کشاورزی حوضه آبریز دریاچه ارومیه هفت ماه آوریل تا اکتبر در سال ۲۰۱۰ میلادی (میلی متر)



شکل ۲۲- تغییرات تبخیر و تعرق مرجع در محل ایستگاه ارومیه

۵-۵- مقایسه نقشه تبخیر و تعرق واقعی حوضه آبریز دریاچه ارومیه با نقشه کاربری اراضی

همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، تبخیر و تعرق شامل دو بخش اصلی تبخیر و تعرق می‌باشد. تبخیر در مناطق مرتعی، از سطح خاک و در اراضی کشاورزی، از سطح خاک اطراف گیاهان رخ می‌دهد. تعرق نیز از سطح گیاهان به وقوع می‌پیوندد. بنابراین با توجه به وجود پوشش گیاهی متراکم‌تر و وسیع‌تر در اراضی کشاورزی و اعمال آبیاری علاوه بر بارش باران، انتظار می‌رود که اراضی کشاورزی نسبت به سایر نواحی حوضه آبریز دریاچه ارومیه از نرخ تبخیر و تعرق واقعی بالاتری برخوردار باشند.

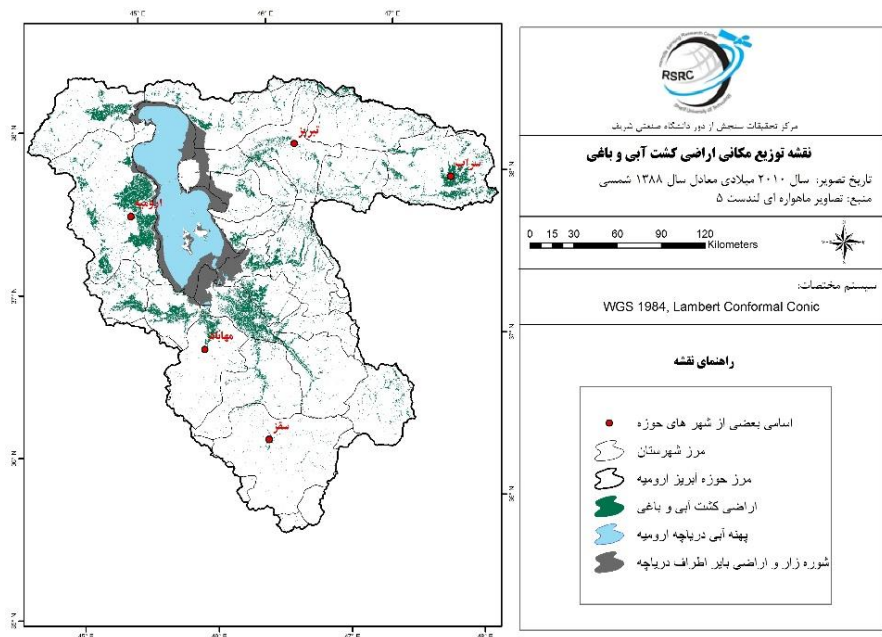
با توجه به مقدمه ارائه شده، می‌توان انتظار داشت که نقاط بیشینه تبخیر و تعرق واقعی در نقشه تجمعی نرخ تبخیر و تعرق واقعی حوضه آبریز دریاچه ارومیه، همان نقاطی باشند که در نقشه کاربری اراضی این حوضه آبریز، به عنوان اراضی کشاورزی معرفی گردیده‌اند. همان‌طور که در شکل ۲۳ نشان داده شده است، نقاطی از اراضی حوضه آبریز دریاچه ارومیه که دارای مقادیر تجمعی نرخ تبخیر و تعرق واقعی بالاتری بوده‌اند (که در شکل ۲۳-ب با رنگ قرمز پررنگ نشان داده شده است) کاملاً منطبق با توزیع مکانی اراضی کشت باغی و آبی مشخص شده در شکل ۲۳-الف می‌باشد. بنابراین می‌توان این‌گونه نتیجه گرفت که با تعیین توزیع مکانی نرخ تبخیر و تعرق واقعی هر حوضه آبریز با استفاده از الگوریتم SEBAL اصلاح شده و تعیین حد آستانه مناسب، می‌توان به نوعی به روش معکوس توزیع مکانی اراضی کشاورزی باغی و زراعی منطقه را به دست آورد. در روند محاسبه‌ی الگوریتم SEBAL، اراضی کشاورزی و جنگل‌ها از هم تفکیک نمی‌شوند در نتیجه، امکان دارد که تبخیر و تعرق برآورد شده، مربوط به مجموع این اراضی باشد. ولی از آنجا

که در حوضه آبریز دریاچه ارومیه، سطح پوشش گیاهی طبیعی (جنگل) در مقایسه با اراضی کشاورزی، ناچیز است می توان پوشش گیاهی عمده منطقه را به اراضی باغی و زراعی محدود و از پوشش گیاهی طبیعی صرف نظر کرد.

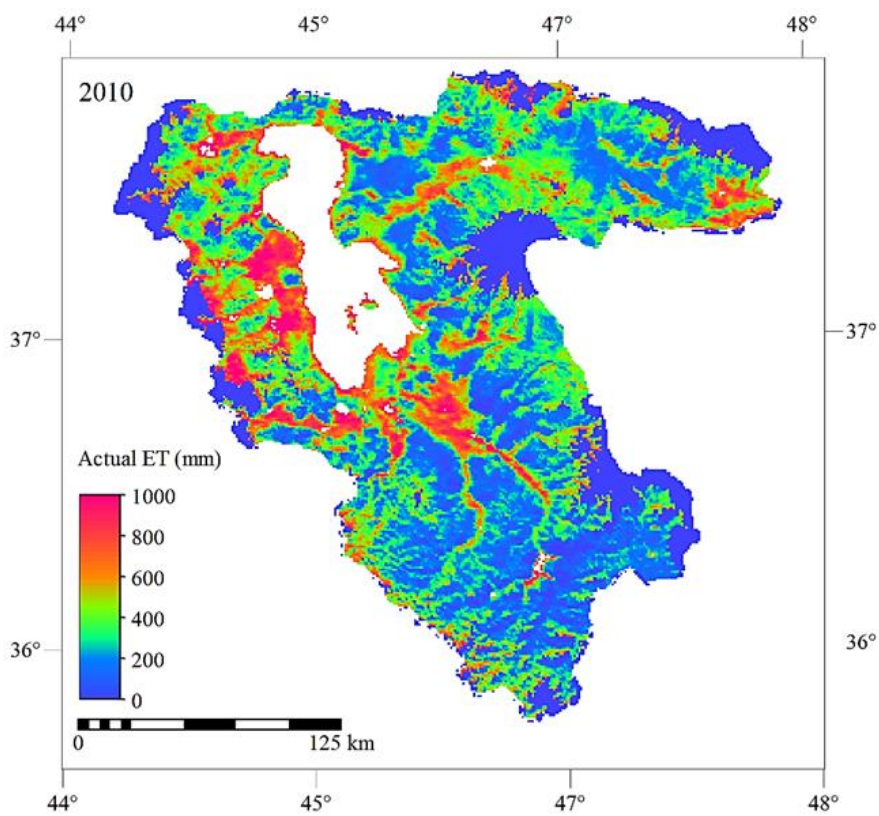
۵-۶- مقایسه مقادیر برآورد شده با داده های زمینی

اگرچه ۴ ایستگاه لایسیمتر در حوضه موجود می باشد ولی در زمان تنظیم این گزارش، تنها داده های ۱۶ روز از ماه های آوریل، می، ژوئن و جولای ایستگاه مزرعه تحقیقاتی دانشگاه تبریز موجود بوده است. با توجه به روزها و ماه های مورد مطالعه، تنها داده های چهار تاریخ یعنی بیست و هفتم ماه می، سوم ماه ژوئن، نهم ماه جولای و سی ام ماه جولای قابل مقایسه می باشد. نتایج داده های اندازه گیری شده در ایستگاه لایسیمتری و داده های محاسبه شده در نقشه های تولیدی به روش الگوریتم SEBAL اصلاح شده با اثر شیب و جهت شیب در جدول ۷ نشان داده شده است. مقایسه نتایج نشان می دهد که مقادیر لایسیمتر در سه روز کمتر و در یک روز بیشتر از مقادیر محاسباتی توسط الگوریتم می باشند. ضریب تعیین (R^2) میان مقدار تبخیر و تعرق واقعی ثبت شده بوسیله لایسیمتر و تبخیر و تعرق محاسبه شده با استفاده از SEBAL، برابر با ۰/۸۴ به دست آمده است (شکل ۲۴). همچنین با توجه به داده های جدول ۷، درصد اختلاف بین نتایج SEBAL و لایسیمتر در روزهای مورد اشاره، به ترتیب ۶، ۷، ۲۲ و ۴۰- درصد می باشد. مقدار شاخص RMSE برابر با ۱/۳ میلی متر می باشد که نسبت به میانگین تبخیر و تعرق ثبت شده توسط لایسیمتر، برابر با ۲۴٪ است. مقدار MBE نیز ۰/۵۳ میلی متر است. با توجه به مقادیر شاخص های اشاره شده در بالا می توان نتایجی را اظهار کرد که عبارتند از:

- ضریب تعیین تقریباً نزدیک به یک است و نشان می دهد که روند تغییرات زمانی تبخیر و تعرق تخمینی و واقعی، شبیه یکدیگر است.
- مقدار شاخص RMSE کم بوده و نشان از دقت قابل قبول الگوریتم مورد نظر در این مطالعه است.
- عدد مثبت MBE نشان می دهد الگوریتم مورد نظر، مقدار تبخیر و تعرق را کم برآورد می کند.



الف



ب

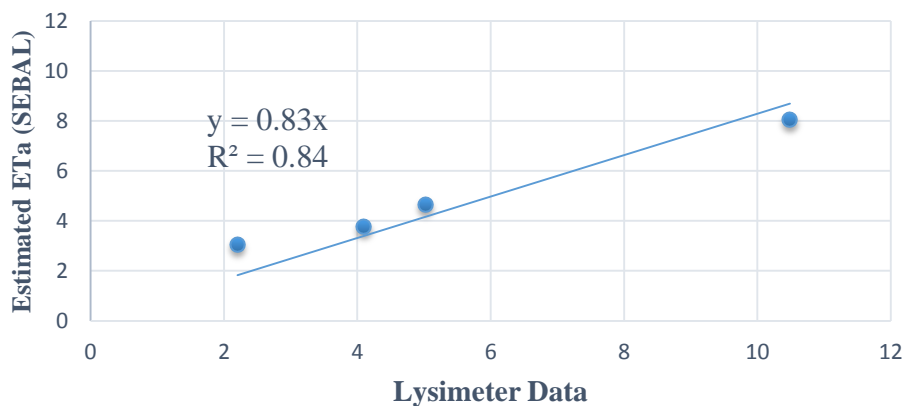
شکل ۲۳- الف: نقشه توزیع مکانی اراضی کشت آبی و باغی حوضه آبریز دریاچه ارومیه در سال میلادی ۲۰۱۰ (مرکز تحقیقات سنجش از دور دانشگاه صنعتی شریف) ب: نقشه تجمعی نرخ تبخیر و تعرق واقعی حوضه آبریز دریاچه ارومیه در سال میلادی ۲۰۱۰

اگرچه Tasumi و همکاران نیز در مطالعه خود که در منطقه Idaho با شرایط نیمه خشک و با استفاده از تصاویر Landsat صورت گرفته، به نتایج مشابهی دست یافته‌اند (Tasumi et al. 2005)، اما کمبود اطلاعات ثبت شده زمینی باعث می‌شود که نتایج مورد اشاره در بالا، صرفاً حدس و گمان بوده و نتوان با قاطعیت نسبت به آن‌ها اظهار نظر نمود.

جدول ۷- مقایسه مقادیر ثبت شده ارتفاع تبخیر و تعرق واقعی در ایستگاه لایسیمتر تبریز و مقادیر تخمین زده شده توسط

الگوریتم SEBAL اصلاح شده با اثر شیب و جهت شیب در سال ۲۰۱۰

ارتفاع تبخیر و تعرق واقعی (SEBAL) (میلی متر)	ارتفاع تبخیر و تعرق واقعی (لایسیمتر) (میلی متر)	تاریخ
۴/۷	۵/۰	۲۷ می (۶ خرداد)
۳/۸	۴/۱	۳ ژوئن (۱۳ خرداد)
۸/۱	۱۰/۵	۹ جولای (۱۸ تیر)
۳/۱	۲/۲	۳۰ جولای (۸ مرداد)



شکل ۲۴- نمودار مقایسه نتایج نرخ تبخیر و تعرق واقعی و اعداد ایستگاه لایسیمتری تبریز در سال میلادی ۲۰۱۰

در ایستگاه لایسیمتر، مقدار متوسط ارتفاع تبخیر و تعرق واقعی برای محدوده کوچک دایره‌ای به قطر ۳۰ متر ارائه می‌شود، یعنی حدود ۷۰۰ مترمربع، حال آنکه تفکیک مکانی نقشه‌های تولیدی توسط روش SEBAL در این مطالعه، سلول‌های با ابعاد ۱ کیلومتر در ۱ کیلومتر می‌باشند که این خود عملاً امکان مقایسه مناسب را محدود می‌نماید. با کاهش قابلیت تفکیک مکانی نقشه‌های تولیدی با استفاده از تغییر سنجنده مورد

استفاده و یا ریزمقیاس نمودن تصاویر و هم چنین افزایش تعداد روزها و ایستگاه های لایسیمتری می توان امکان مقایسه مناسب تری را بین دو نقطه از مدل سازی و داده واقعی از محل برقرار نمود.

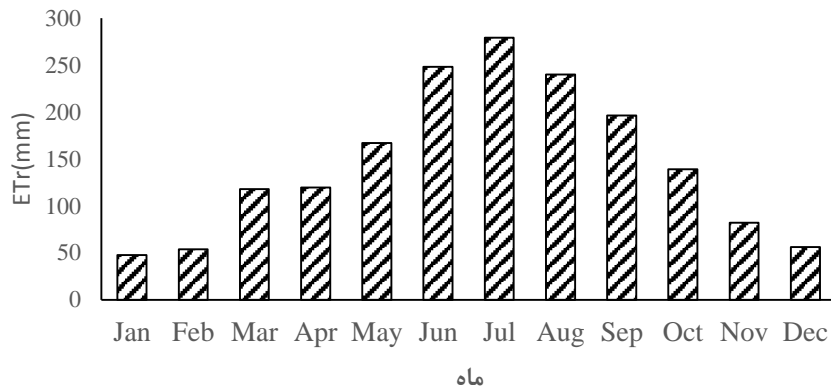
۵-۷- برآورد نیاز آبی محصولات در اراضی آبی

با توجه به روابط و مفاهیم ارائه شده در قبل، جهت برآورد نیاز آبی گیاه در اراضی آبی در سال ۲۰۱۰ میلادی، دو ترم بارش سالانه و نرخ تبخیر و تعرق واقعی برآورد شده اند. با توجه به مساحت اراضی آبی در هر ماه، مقادیر حجمی هر یک از این دو ترم محاسبه و به صورت تجمعی سالانه جهت استفاده در معادله (۴۶) تخمین زده شده است. با توجه به محاسبه نرخ تبخیر و تعرق واقعی در هفت ماه میلادی آوریل تا اکتبر ۲۰۱۰ میلادی، فرض شده است که نرخ تبخیر و تعرق واقعی برای سایر ماه ها ناچیز باشند. صحت این فرض را می توان از طریق بررسی مقادیر ماهانه تبخیر و تعرق مرجع مورد بررسی قرار داد (شکل ۲۵). با توجه به این شکل مشاهده می شود مقادیر تبخیر و تعرق مرجع در ماه های ابتدایی و انتهایی سال به دلیل شرایط اقلیمی سرد منطقه در مقایسه ماه های گرم سال اندک و قابل صرف نظر می باشد و تبخیر و تعرق مرجع در این ماه ها حدود ۲۰٪ از مجموع سالانه را تشکیل می دهد.

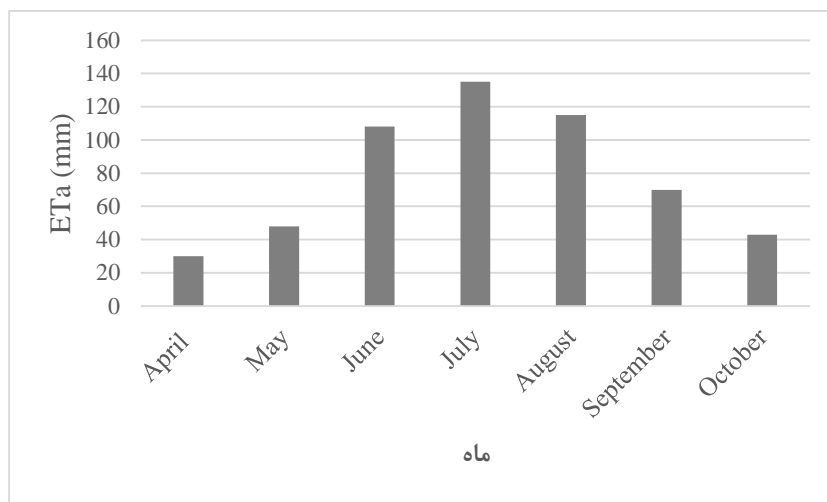
تبخیر و تعرق مرجع به عنوان یکی از متغیرهای اقلیمی شناخته می شود و در بسیاری از مطالعات جهت بررسی تغییرات اقلیم از این متغیر به عنوان مبنای مقایسه استفاده می گردد. مجموع سالانه ارتفاع تبخیر و تعرق واقعی طی سال ۲۰۱۰ میلادی معادل ۱۷۴۸ میلی متر می باشد که حدود ۶۵٪ از این مقدار در ماه های می تا اکتبر اتفاق می افتد. بیشینه مقدار تبخیر و تعرق مرجع (معادل ۲۸۰ میلی متر) متعلق به ماه جولای (تیر) بوده و کمترین مقدار (معادل ۴۷ میلی متر) نیز به ماه ژانویه (دی) تعلق دارد.

در شکل ۲۶ نرخ تبخیر و تعرق واقعی متوسط ماهانه سال ۲۰۱۰ میلادی اراضی آبی حوضه دریاچه ارومیه نشان داده شده است. در مقیاس سالانه، با در نظر گرفتن سطح زیر کشت اراضی زراعی و باغی، حجم بارش مؤثر سالانه روی این اراضی حوضه حدود ۱۱۹۳ میلیون متر مکعب برآورد شده است. در شکل ۲۷ مقادیر بارش مؤثر متوسط ماهانه طی سال ۲۰۱۰ میلادی در اراضی زراعی و باغی حوضه دریاچه ارومیه نشان داده شده است. هم چنین با استخراج نقشه تغییرات مکانی ارتفاع تبخیر و تعرق واقعی در مقیاس سالانه، حجم تبخیر و تعرق واقعی صورت گرفته از سطح اراضی زراعی و باغی حوضه آبریز دریاچه ارومیه، ۳۱۳۵ میلیون متر مکعب تخمین زده شده است. با استفاده از معادله (۴۶) و با کم کردن حجم بارش مؤثر از حجم تبخیر و

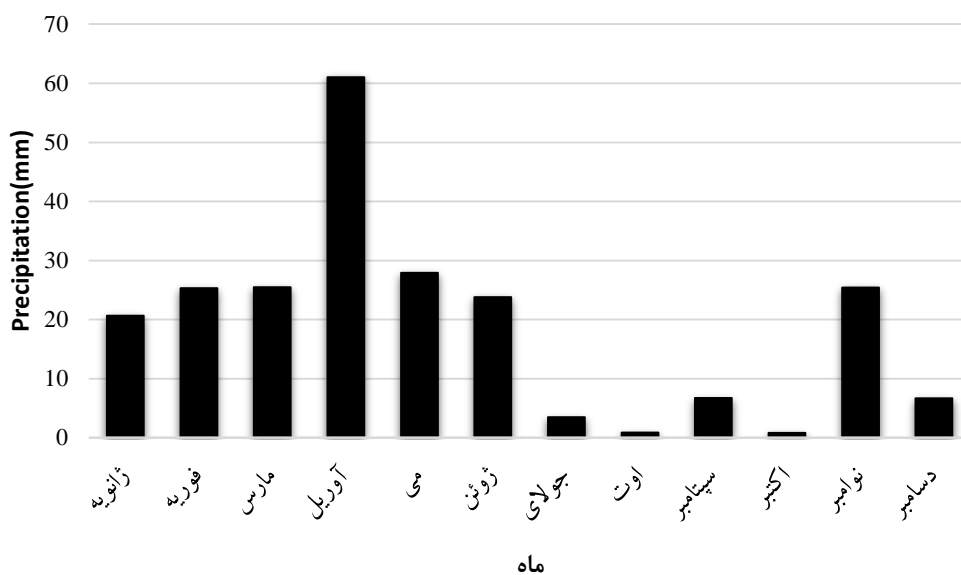
تعرق واقعی صورت گرفته، حجم آبیاری اعمال شده در اراضی آبی حوضه آبریز دریاچه ارومیه، معادل ۱۹۴۲ میلیون مترمکعب برآورد می گردد.



شکل ۲۵- نرخ ماهانه تبخیر و تعرق مرجع در سال ۲۰۱۰ میلادی (میلی متر)



شکل ۲۶- تغییرات زمانی میانگین نرخ تبخیر و تعرق واقعی اراضی کشاورزی حوضه آبریز دریاچه ارومیه هفت ماه آوریل تا اکتبر در سال ۲۰۱۰ (میلی متر)

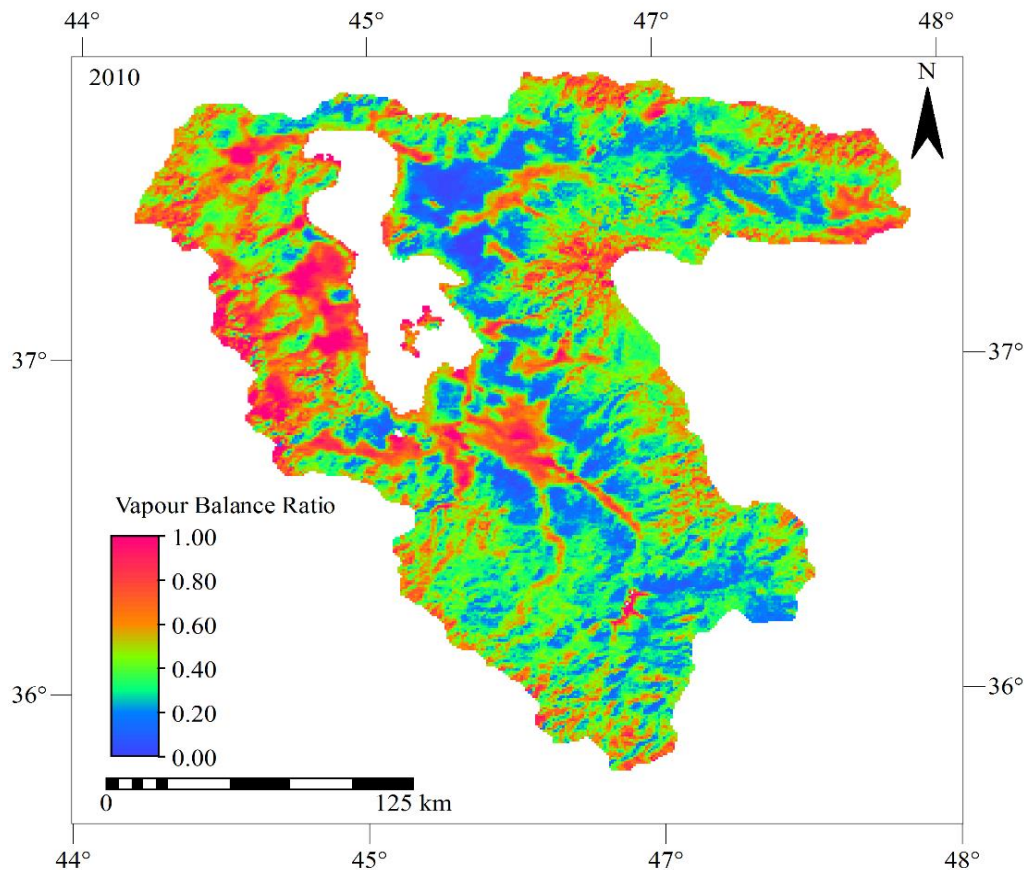


شکل ۲۷- تغییرات زمانی بارش مؤثر میانگین ماهانه اراضی زراعی باغی حوضه آبریز دریاچه ارومیه در سال ۲۰۱۰ (میلی متر)

۵-۸- بیلان بخار حوضه آبریز

با استفاده از تقسیم نقشه های ماهانه نرخ تبخیر و تعرق واقعی محاسبه شده به روش SEBAL اصلاح شده بر مقادیر تبخیر واقعی برآورد شده از سطح دریاچه در مطالعه سیما، نقشه های نرمال شده ماهانه بیلان بخار حوضه دریاچه ارومیه در سال ۲۰۱۰ میلادی به دست آمده است (سیما، ۱۳۹۲). تغییرات مکانی نقشه ها در همراه نشان می دهد که مناطق با پوشش گیاهی بیشتر، مطابق انتظار، از اعداد نرمال شده بالاتری برخوردار هستند. بنابراین توزیع مکانی نقشه نرمال شده مشابه نقشه نرخ تبخیر و تعرق واقعی ماهانه محاسبه شده خواهد بود. با توجه به بیشتر بودن مقادیر تبخیر از پهنه آبی (دریاچه ارومیه) نسبت به مقادیر تبخیر و تعرق سایر نواحی حوضه آبریز، اعداد نرمال شده بیلان بخار، از مقدار واحد بیشتر نخواهند بود. هرچه عدد نرمال شده بیلان بخار در یک منطقه به یک نزدیک تر باشد، آن منطقه ارزش بالاتری جهت کمک به احیای دریاچه ارومیه از طریق کاهش مصرف آب کشاورزی خواهد داشت. اما ذکر این نکته مهم است که بزرگ بودن عدد نرمال شده بیلان بخار، لزوماً نشان دهنده الگوی نامناسب آبیاری نیست. به عبارت دیگر، عواملی مانند کشت گیاهان پرآب (مانند چغندر قند) و نوع سیستم آبیاری هم می توانند باعث افزایش عدد نرمال شده بیلان بخار بشوند. اگرچه نقشه عدد نرمال شده بیلان بخار، برای تصمیم گیران سیاست های کاهش مصرف کشاورزی جهت اولویت بندی مناطق مفید است (شکل ۲۸)، اما از آنجا که اصلاح الگوی کشت و بهبود

سیستم آبیاری خارج از حیطه این مطالعه قرار دارد، باید آن بخش از میزان صرفه جویی مصرف آب کشاورزی که تنها در اثر اصلاح الگوی آبیاری به دست می آید، برآورد شود که در ادامه بیان خواهد شد.



شکل ۲۸- بیلان بخار حوضه آبریز دریاچه ارومیه طی هفت ماه از ماه میلادی آوریل تا اکتبر ۲۰۱۰

با توجه شکل ۲۸، اراضی زراعی و باغی موجود در کرانه غربی دریاچه ارومیه مقادیر بالاتری از نسبت بیلان بخار را نسبت به سایر اراضی زراعی و باغی موجود در حوضه نشان می دهند. این بدان معناست کاهش مصرف آب در این نواحی ارزش نسبی بیشتری را در جهت احیای دریاچه نسبت به دیگر مناطق زراعی حوضه دارد.

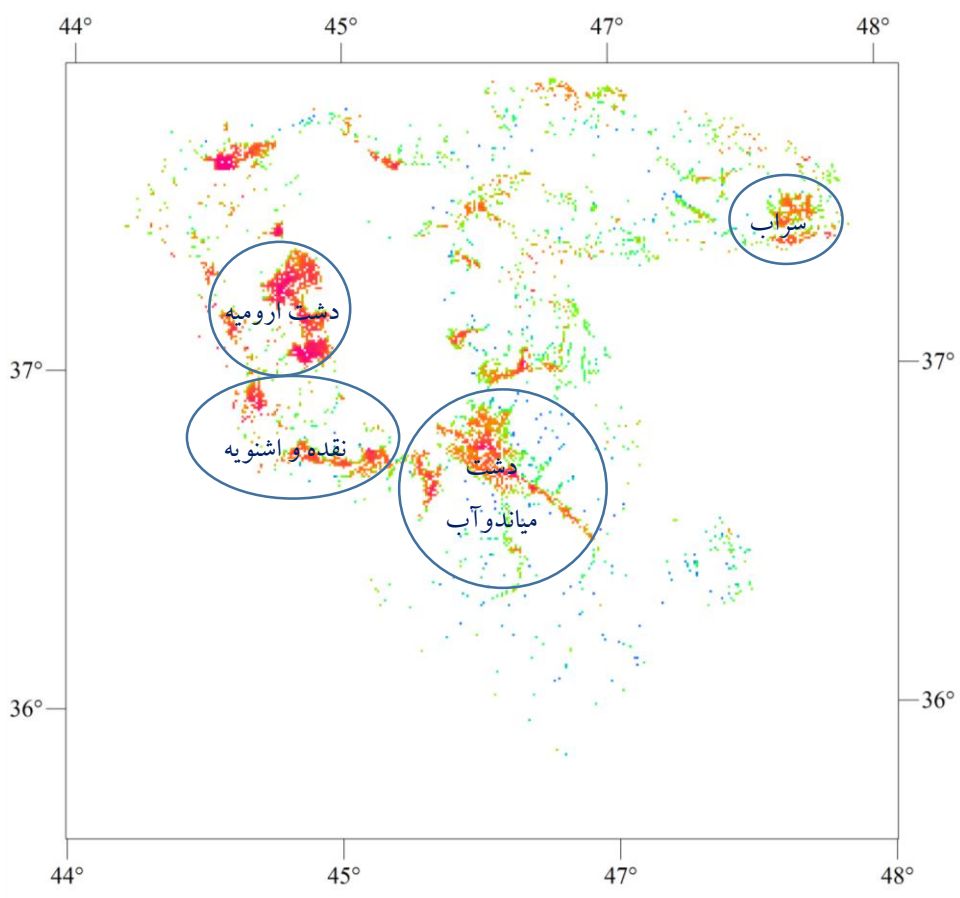
۵-۹- حجم آب قابل صرفه جویی در مناطق عمده زراعی حوضه آبریز ارومیه در سال ۲۰۱۰

برای محاسبه میزان صرفه جویی، اطلاعات کاملی از نوع محصولات زراعی و باغی منطقه، سطح زیر کشت هر محصول، میزان بارش مؤثر و مقادیر مصرف مورد نیاز می باشد. برای این منظور آمار مربوط به سطح زیر

کشت محصولات زراعی و باغی استان های آذربایجان شرقی و غربی وزارت جهاد کشاورزی مورد استفاده قرار گرفت.

با بررسی دوره رشد محصولات زراعی و باغی مختلف حوضه آبریز دریاچه ارومیه، مشخص گردید عمده کشت این منطقه در ماه های فروردین تا مهر (آوریل تا اکتبر) صورت می گیرد. از آنجا که محاسبات انجام شده در مورد تبخیر و تعرق در این مطالعه در همین ماه ها می باشد، لذا می توان با محاسبه میزان بارش مؤثر صورت گرفته طی همین مدت (ماه های آوریل تا اکتبر)، میزان نیاز آبی، میزان آبیاری اعمال شده و درصد صرفه جویی قابل حصول در هر منطقه را بدست آورد.

برای انجام تحلیل ها به منظور تخمین میزان آب قابل صرفه جویی، حوضه آبریز دریاچه ارومیه به ۴ منطقه اصلی تقسیم بندی گردید (شکل ۲۹). این ۴ محدوده، مناطقی هستند که بیشترین نرخ تبخیر و تعرق واقعی را دارا می باشند. بنابراین، میزان آب قابل صرفه جویی برای هر یک از این مناطق مورد محاسبه قرار خواهد گرفت.



شکل ۲۹- نقشه نرخ تبخیر و تعرق واقعی و تفکیک مناطق عمده زراعی و باغی حوضه آبریز دریاچه ارومیه

۵-۹-۱- دشت میاندوآب

محصولات زراعی عمده ای که در این منطقه کشت می شوند عبارت اند از گندم، جو، یونجه، چغندر قند، سیب زمینی و گوجه فرنگی. از طرف دیگر، عمده محصولات باغی کشت شده در این منطقه عبارت اند از سیب، انگور، گیلاس و توت. میزان سطح زیر کشت و نیاز آبی محصولات عمده محدوده دشت میاندوآب بر اساس آمار وزارت جهاد کشاورزی، در جدول ۸ ارائه گردیده است. محاسبات صورت گرفته در مورد ۴۶۸۱۳ هکتار از مجموع ۵۰۶۹۳ هکتاری سطح زیر کشت آبی در این منطقه می باشد. به عبارت دیگر، نیاز آبی محاسبه شده معادل میزان نیاز در ۹۳٪ از سطح زیر کشت آبی در این منطقه می باشد.

جدول ۸- سطح زیر کشت و نیاز آبی در محدوده دشت میاندوآب

محصول	سطح زیر کشت (هکتار)	تبخیر تعرق پتانسیل (میلی تر در سال)	حجم کل نیاز آبی (مترمکعب)
گندم	۱۵۹۰۰	۳۸۲	۶۰۷۳۸۰۰۰
جو	۴۶۵۰	۳۰۳	۱۴۰۸۹۵۰۰
ذرت دانه ای	۱۸۰۰	۴۶۷	۸۴۰۶۰۰۰
لوبیا	۸	۴۰۹	۳۲۷۲۰
سیب زمینی	۵۳	۶۱۸	۳۲۷۵۴۰
پیاز	۷۵۰	۶۲۹	۴۷۱۷۵۰۰
سبزیجات	۳۱۰	۳۲۴	۱۰۰۴۴۰۰
چغندر قند	۵۰۰۰	۶۹۶	۳۴۸۰۰۰۰۰
خریزه	۶۵۱	۳۸۶	۲۵۱۲۸۶۰
هنوانه	۲۹۵	۳۸۶	۱۱۳۸۷۰۰
یونجه	۱۰۵۷۰	۷۷۳	۸۱۷۰۶۱۰۰
سیب	۳۶۰۶	۶۴۲	۲۳۱۵۰۵۲۰
گلایی	۱	۶۴۲	۶۴۲۰
آلبالو	۵	۵۸۳	۲۹۱۵۰
انواع گیلاس	۴	۵۸۳	۲۳۳۲۰
زردآلو	۲۹۰	۵۳۳	۱۵۴۵۷۰۰
انواع انگور	۲۷۲۵	۵۶۷	۱۵۴۵۰۷۵۰
گردو	۱۹۵	۷۳۹	۱۴۴۱۰۵۰
مجموع	۴۶۸۱۳		۲۵۱۱۲۰۲۳۰

➤ حجم آب مورد نیاز در دشت میاندوآب

میزان نیاز خالص آبی سالانه (تبخیر و تعرق پتانسیل) هر یک از محصولات باغی و زراعی در این منطقه که توسط نرم افزار NETWAT برآورد شده، در جدول ۸ ارائه گردیده است. با توجه به این جدول، مجموع سطح زیر کشت اراضی آبی زراعی و باغی در دشت میاندوآب برابر با ۴۶۸۱۳ هکتار و همچنین مجموع میزان نیاز خالص آبی محصولات زراعی و باغی محدوده دشت میاندوآب و در طول دوره رشد حدود ۲۵۱ میلیون متر مکعب می باشد. بخشی از نیاز ذکر شده توسط بارش مؤثر فراهم شده و بخش دیگر می بایست از طریق آبیاری تأمین شود.

➤ حجم آب تأمین شده توسط بارش در دشت میاندوآب

جهت تخمین بخشی از نیاز آبی که توسط بارش مؤثر تأمین می شود، محدوده دشت میاندوآب را از نقشه بارش در طول دوره رشد در سال ۲۰۱۰ میلادی جدا کرده و حجم بارندگی صورت گرفته در این منطقه مورد محاسبه قرار گرفت. بارش مؤثر سالانه صورت گرفته در محدوده دشت میاندوآب در طول دوره رشد به طور میانگین برابر با ۱۱۹ میلی متر بوده است. با در نظر گرفتن این مقدار بارش مؤثر، حجم آب تأمین شده در محدوده اراضی آبی زراعی و باغی این دشت در طول دوره رشد گیاه برابر خواهد بود با:

$$119 \times 46813 \times 10^{-5} = 55.7 \text{ MCM}$$

➤ حجم آب مصرف شده در دشت میاندوآب

میزان آب مصرف شده توسط پوشش گیاهی در محدوده دشت میاندوآب را می توان با استفاده از نقشه ارتفاع تبخیر و تعرق واقعی این منطقه بدست آورد. متوسط مصرف خالص صورت گرفته در بین ماه های آوریل تا اکتبر در محدوده اراضی دشت میاندوآب برابر با ۶۷۳ میلی متر می باشد. با در نظر گرفتن مساحت ۴۶۸۱۳ هکتاری اراضی زراعی و باغی، میزان کل خالص مصرف صورت گرفته برابر با ۳۱۵ میلیون متر مکعب خواهد بود. بخشی از این مصرف توسط بارش مؤثر تأمین شده و بخشی دیگر توسط آبیاری تأمین می شود.

➤ تخمین میزان آب قابل صرفه جویی در دشت میاندوآب

همان طور که محاسبات انجام شده نشان می دهند، میزان کل نیاز آبی خالص محصولات زراعی و باغی عمده (که در برگیرنده بیش از ۸۰ درصد سطح زیر کشت منطقه می باشد) معادل ۲۵۱ میلیون متر مکعب خواهد بود. از این مقدار نیاز آبی، حدود ۵۶ میلیون متر مکعب توسط بارش مؤثر تأمین و باقیمانده آن یعنی حدود ۱۹۵ میلیون متر مکعب از نیاز آبی محصولات، می بایست توسط آبیاری تأمین شود.

همان طور که ذکر شد، مطابق محاسبات انجام شده، میزان آب مصرف شده در اراضی زراعی و باغی مربوط به کشت آبی دشت میاندوآب برابر با ۳۱۵ میلیون متر مکعب برآورد شده است که از این مقدار حدود ۵۶ میلیون متر مکعب توسط بارش مؤثر تأمین شده است. بنابراین، حجمی از آب که توسط آبیاری تأمین شده است برابر خواهد بود با ۲۵۹ میلیون متر مکعب. لذا با توجه به محاسبات فوق، میزان صرفه جویی قابل حصول در بخش آبیاری برابر خواهد بود با:

(۴۸) آبیاری انجام شده / 100 × (آبیاری انجام شده - آبیاری مورد نیاز) = میزان صرفه جویی

$$((259 - 195) / 259) \times 100 = 25\%$$

بنابراین، میزان صرفه جویی قابل انجام در حجم آبیاری اراضی زراعی و باغی دشت میاندوآب برابر با ۲۵٪ خواهد بود.

در رابطه با محاسبات صورت گرفته، ذکر این نکته ضروری است که این میزان صرفه جویی، برآوردی دست بالا می باشد؛ چرا که تمام بارش مؤثر صورت گرفته نمی تواند جهت تأمین نیاز آبی گیاه مورد استفاده قرار گیرد. بارندگی مؤثر مورد نظر در این مطالعه، در برگیرنده بارش هایی نیز می باشد که به صورت ممتد و در طی چندین روز متوالی به وقوع پیوسته است؛ در چنین شرایطی بارش مؤثر روز دوم به دلیل وجود رطوبت باقیمانده از بارش مؤثر روز اول نمی تواند به طور کامل مورد استفاده گیاه قرار گیرد. همچنین تأمین صد در صد آب مورد نیاز گیاه نیز با توجه به ارزش اقتصادی محصولات تولیدی به ازای آب مصرفی به عنوان یک اقدام نامتعارف شناخته می شود و لذا می توان با مصرف آب کمتر همچنان به یک محصول اقتصادی با بیشترین بهره وری از آب دست یافت (اعمال کم آبیاری).

۵-۹-۲- منطقه زراعی سراب

محاسبات مربوط به حجم آب قابل صرفه جویی در منطقه سراب نیز همانند آنچه در مورد دشت میاندوآب صورت گرفت انجام پذیرفت. میزان سطح زیر کشت و نیاز آبی محصولات عمده محدوده شهرستان سراب بر اساس آمار وزارت جهاد کشاورزی، در جدول ۹ ارائه گردیده است. محاسبات صورت گرفته در مورد ۴۶۸۶۴ هکتار از مجموع ۵۰۳۲۰ هکتاری سطح زیر کشت آبی در این منطقه می باشد. به عبارت دیگر، نیاز آبی محاسبه شده معادل میزان نیاز آبی در ۹۳٪ از سطح زیر کشت آبی در این منطقه می باشد. بر اساس این جدول، مجموع سطح زیر کشت آبی در این منطقه برابر ۴۶۸۶۴ هکتار و مجموع نیاز آبی سالانه محصولات آن حدود ۲۷۲ میلیون متر مکعب می باشد.

جدول ۹- سطح زیر کشت و نیاز آبی در محدوده شهرستان سراب

نوع محصول	سطح زیر کشت (هکتار)	تبخیر و تعرق پتانسیل (میلی متر)	نیاز آبی (متر مکعب)
گندم	۱۲۰۰۰	۳۴۴	۴۱۲۸۰۰۰۰
جو	۶۱۵۴	۲۶۶	۱۶۳۶۹۶۴۰
انواع لوبیا	۱۰۵۰	۳۹۴	۴۱۳۷۰۰۰
سیب زمینی	۳۸۳۰	۶۱۱	۲۳۴۰۱۳۰۰
یونجه	۸۹۸۰	۷۵۲	۶۷۵۲۹۶۰۰
اسپرس	۱۴۴۰۰	۸۱۸	۱۱۷۷۹۲۰۰۰
خیار	۴۵۰	۳۵۱	۱۵۷۹۵۰۰
مجموع	۴۶۸۶۴		۲۷۲۰۸۹۰۴۰

با توجه به نقشه ارتفاع تبخیر و تعرق واقعی در طول فصل کشت در سال ۲۰۱۰ میلادی، نرخ تبخیر و تعرق واقعی سالانه در اراضی این منطقه حدوداً برابر با ۶۱۰ میلی متر می باشد که با در نظر گرفتن سطح زیر کشت ۴۶۸۶۴ هکتاری، میزان مصرف خالص صورت گرفته معادل ۳۰۷ میلیون متر مکعب خواهد بود. همچنین، میزان بارش مؤثر صورت گرفته در این منطقه در طی دوره رشد در سال ۲۰۱۰ میلادی برابر با ۲۵۴ میلی متر می باشد که با در نظر گرفتن سطح ۴۶۸۶۴ هکتاری اراضی این منطقه، حجم آب تأمین شده توسط بارش مؤثر معادل ۱۲۸ میلیون متر مکعب می باشد.

لذا با توجه به مطالب فوق، از میزان ۲۷۲ میلیون متر مکعب نیاز آبی، حدود ۱۲۸ میلیون متر مکعب آن توسط بارش مؤثر تأمین و میزان آبیاری مورد نیاز معادل ۱۴۴ میلیون متر مکعب خواهد شد. از طرف دیگر، میزان مصرف صورت گرفته برابر با ۳۰۷ میلیون متر مکعب می باشد که از این مقدار حدود ۱۲۸ میلیون متر مکعب آن توسط بارش مؤثر تأمین شده است. بنابراین، میزان آب مصرف شده توسط گیاهان بواسطه آبیاری برابر با ۱۷۹ میلیون متر مکعب خواهد بود. در نتیجه، درصد آب قابل صرفه جویی در منطقه زراعی سراب حدود ۲۰٪ خواهد بود.

۵-۹-۳- دشت ارومیه

اطلاعات مربوط به سطح زیر کشت و میزان نیاز آبی خالص محصولات زراعی و باغی عمده در دشت ارومیه بر اساس آمار وزارت جهاد کشاورزی، در جدول ۱۰ ارائه گردیده است. محاسبات صورت گرفته در مورد ۷۶۳۹۲ هکتار از مجموع ۸۱۶۵۵ هکتاری سطح زیر کشت آبی در این منطقه می باشد. به عبارت دیگر،

نیاز آبی محاسبه شده معادل میزان نیاز آبی در ۹۴٪ از سطح زیر کشت آبی در این منطقه می باشد. طبق این جدول، مجموع سطح زیر کشت آبی در این منطقه معادل ۷۸۱۶۴ هکتار می باشد. همچنین مجموع نیاز آبی سالانه محصولات کشت شده در این دشت معادل ۴۴۳ میلیون متر مکعب می باشد.

جدول ۱۰- سطح زیر کشت و نیاز آبی در محدوده دشت ارومیه

محصول	سطح زیر کشت (هکتار) به مترمربع	تبخیر تعرق پتانسیل (متر در سال)	حجم کل نیاز آبی (مترمکعب)
گندم	۱۸۸۰۰	۳۷۶	۷۰۶۸۸۰۰۰
جو	۱۶۰۰	۲۹۳	۴۶۸۸۰۰۰
لوبیا	۷۱	۴۱۴	۲۹۳۹۴۰
ماش	۱	۳۶۰	۳۶۰۰
سیب زمینی	۳۰۵	۶۲۹	۱۹۱۸۴۵۰
پیاز	۵۰	۶۴۵	۳۲۲۵۰۰
گوجه فرنگی	۳۵۰۰	۵۸۰	۲۰۳۰۰۰۰۰
چغندر قند	۴۰۰	۷۰۵	۲۸۲۰۰۰۰
هندوانه	۱۱۲	۳۹۷	۴۴۴۶۴۰
خیار	۱۹۹	۳۶۷	۷۳۰۳۳۰
یونجه	۱۳۴۵۱	۷۷۰	۱۰۳۵۷۲۷۰۰
ذرت علوفه ای	۳۲۰۰	۴۲۸	۱۳۶۹۶۰۰۰
آفتابگردان	۴۰۴۰	۴۸۷	۱۹۶۷۴۸۰۰
سیب	۱۹۴۳۰	۶۵۴	۱۲۷۰۷۲۲۰۰
گلایبی	۸۶	۶۵۴	۵۶۲۴۴۰
آلبالو	۷۹	۵۹۶	۴۷۰۸۴۰
انواع گیلاس	۳۵۱	۵۹۶	۲۰۹۱۹۶۰
آلو	۵۰۸	۶۳۸	۳۲۴۱۰۴۰
انواع انگور	۹۱۸۴	۵۷۶	۵۲۸۹۹۸۴۰
بادام	۵۰۰	۶۹۶	۳۴۸۰۰۰۰
گردو	۵۲۵	۷۵۰	۳۹۳۷۵۰۰
مجموع	۷۸۱۶۴		۴۴۲۵۵۰۹۲۰

با توجه به نقشه نرخ تبخیر و تعرق واقعی در طول دوره رشد محصولات در سال ۲۰۱۰ میلادی، نرخ تبخیر و تعرق واقعی در اراضی این منطقه برابر با ۸۱۹ میلی متر می باشد که با در نظر گرفتن سطح زیر کشت ۷۸۱۶۴ هکتاری، میزان مصرف خالص آب برابر با ۶۴۰ میلیون متر مکعب می گردد. میزان بارش مؤثر صورت گرفته

در این منطقه در طول دوره رشد در سال ۲۰۱۰ میلادی برابر با ۱۷۳ میلی متر می باشد که با در نظر گرفتن سطح ۷۸۱۶۴ هکتاری اراضی این منطقه، حجم آب تأمین شده توسط بارش مؤثر معادل ۱۳۵ میلیون متر مکعب می گردد.

با توجه به مطالب فوق، از میزان ۴۴۳ میلیون متر مکعبی نیاز خالص آبی، حدود ۱۳۵ میلیون متر مکعب آن توسط بارش مؤثر تأمین می شود و میزان نیاز خالص آبیاری معادل ۳۰۸ میلیون متر مکعب خواهد بود. از طرف دیگر، میزان مصرف صورت گرفته برابر با ۶۴۰ میلیون متر مکعب می باشد که از این مقدار حدود ۱۳۵ میلیون متر مکعب توسط بارش مؤثر تأمین شده است. بنابراین میزان آبیاری صورت گرفته برابر ۵۰۵ میلیون متر مکعب بوده است. در نتیجه میزان آب قابل صرفه جویی در دشت ارومیه حدود ۳۹٪ خواهد بود.

۴-۹-۵- منطقه زراعی نقده و اشنویه

اطلاعات مربوط به سطح زیر کشت و میزان نیاز آبی خالص محصولات زراعی و باغی عمده در منطقه نقده و اشنویه بر اساس آمار وزارت جهاد کشاورزی در

جدول ۱۱ ارائه گردیده است. محاسبات صورت گرفته در مورد ۳۴۷۰۰ هکتار از مجموع ۴۱۳۳۵ هکتاری سطح زیر کشت آبی در این منطقه می باشد. به عبارت دیگر، نیاز آبی محاسبه شده معادل میزان نیاز آبی در ۸۴٪ از سطح زیر کشت آبی در این منطقه می باشد. بر اساس این جدول، مجموع سطح زیر کشت آبی در این منطقه معادل ۳۴۷۰۰ هکتار می باشد. همچنین مجموع نیاز آبی سالانه محصولات کشت شده در این دشت معادل ۱۹۴ میلیون متر مکعب می باشد.

با توجه به نقشه ارتفاع تبخیر و تعرق واقعی در طول دوره رشد در سال ۲۰۱۰ میلادی، نرخ تبخیر و تعرق واقعی در اراضی این منطقه برابر با ۷۶۳ میلی متر می باشد که با در نظر گرفتن سطح زیر کشت ۳۴۷۰۰ هکتاری، میزان مصرف خالص صورت گرفته برابر با ۲۶۵ میلیون متر مکعب می باشد. همچنین، میزان بارش مؤثر صورت گرفته در این منطقه در طی دوره رشد در سال ۲۰۱۰ میلادی برابر با ۱۰۴ میلی متر می باشد که با در نظر گرفتن سطح ۳۴۷۰۰ هکتاری اراضی این منطقه، حجم آب تأمین شده توسط بارش مؤثر معادل ۳۶ میلیون متر مکعب می باشد.

جدول ۱۱- سطح زیر کشت و نیاز آبی در محدوده شهرستان های نقده و اشنویه

نیاز آبی (متر مکعب)	تبخیر و تعرق پتانسیل (میلیمتر)	سطح زیر کشت (هکتار)			محصول
		مجموع	اشنویه	نقده	
۴۳۹۳۰۰۰۰	۳۸۲	۱۱۵۰۰	۵۶۵۰	۵۸۵۰	گندم
۴۸۴۸۰۰۰	۳۰۳	۱۶۰۰	۸۵۰	۷۵۰	جو
۲۴۵۸۰۹۰	۴۰۹	۶۰۱	۵۶۱	۴۰	لوبیا
۱۸۰۹۵۰۰	۳۲۹	۵۵۰	۴۶۸	۸۲	نخود
۲۵۰۶۰	۳۵۸	۷	۷	۰	ماش
۸۷۱۳۸۰	۶۱۸	۱۴۱	۰	۱۴۱	سیب زمینی
۴۴۰۳۰۰	۶۲۹	۷۰	۸	۶۲	پیاز
۵۴۲۸۸۰۰۰	۶۹۶	۷۸۰۰	۲۶۰۰	۵۲۰۰	چغندر قند
۳۸۹۵۱۴۷۰	۷۷۳	۵۰۳۹	۳۱۴۸	۱۸۹۱	یونجه
۱۹۸۷۴۰	۵۲۳	۳۸	۳۸	۰	توتون
۳۹۰۰۷۹۲۰	۶۴۲	۶۰۷۶	۲۴۷۰	۳۶۰۶	سیب
۲۵۶۸۰	۶۴۲	۴	۳	۱	گللابی
۲۶۸۱۸۰	۵۸۳	۴۶	۴۵	۱	آلبالو
۸۳۹۵۲۰	۵۸۳	۱۴۴	۱۴۴	۰	انواع گیلاس
۹۸۰۷۲۰	۵۳۳	۱۸۴	۱۱۸	۶۶	زردآلو
۴۱۲۷۷۶۰	۵۶۷	۷۲۸	۳۰	۶۹۸	انواع انگور
۱۲۷۱۰۸۰	۷۳۹	۱۷۲	۱۴۵	۲۷	گردو
۱۹۴۳۴۱۴۰۰		۳۴۷۰۰	۱۶۲۸۵	۱۸۴۱۵	مجموع

بنابراین، از میزان ۱۹۴ میلیون متر مکعبی نیاز آبی، حدود ۳۶ میلیون متر مکعب آن توسط بارش مؤثر تأمین و میزان نیاز آبیاری معادل ۱۵۸ میلیون متر مکعب خواهد بود. از طرف دیگر، میزان مصرف برابر با ۲۶۵ میلیون متر مکعب می باشد که از این مقدار حدود ۳۶ میلیون متر مکعب توسط بارش مؤثر تأمین شده است. لذا میزان آبیاری معادل ۲۲۹ میلیون متر مکعب خواهد بود. بنابراین آب قابل صرفه جویی در منطقه نقده و اشنویه حدود ۳۱٪ خواهد بود.

۵-۱۰- جمع بندی میزان پتانسیل آب قابل صرفه جویی در مناطق مختلف حوضه آبریز دریاچه ارومیه

در بخش ۵-۹، پتانسیل صرفه جویی در حجم آبیاری مورد نیاز در مناطق عمده زراعی حوضه آبریز ارومیه بررسی گردید. خلاصه این نتایج در جدول ۱۲ با فرض آمده است. در میان مناطق مورد بررسی، دشت ارومیه بیشترین مساحت زیر کشت آبی را با ۷۶۶۵۳ هکتار دارا است. پس از آن، دشت میاندوآب و سراب سطحی تقریباً برابر با حدود ۴۷۸۰۰ هکتار را دارا بوده و منطقه زراعی نقده و اشنویه با ۳۴۷۰۰ هکتار کمترین سطح را داراست.

جدول ۱۲- خلاصه نتایج محاسبات صرفه جویی در حوضه ارومیه

منطقه	سطح زیر کشت آبی (هکتار)	مصرف آب (MCM)	نیاز آبی (MCM)		بارش (MCM)	حجم قابل صرفه جویی (MCM)		درصد صرفه جویی	
			%۸۰	%۱۰۰		%۸۰	%۱۰۰	%۸۰	%۱۰۰
دشت میاندوآب	۴۶۸۱۳	۳۱۵	۲۵۱	۲۰۱	۵۶	۶۴	۱۱۴	۲۵	۴۴
سراب	۴۶۸۶۴	۳۰۷	۲۷۲	۲۱۸	۱۲۸	۳۵	۸۹	۲۰	۵۰
دشت ارومیه	۷۸۱۶۴	۶۴۰	۴۴۳	۳۵۴	۱۳۵	۱۹۷	۲۸۶	۳۹	۵۷
نقده و اشنویه	۳۴۷۰۰	۲۶۵	۱۹۵	۱۵۶	۳۶	۷۰	۱۰۹	۳۱	۴۸

در میان مناطق مورد بررسی، بیشترین مصرف آب به دشت ارومیه با ۶۴۰ میلیون متر مکعب اختصاص داشته و کمترین مصرف نیز به منطقه نقده و اشنویه با ۲۶۵ میلیون متر مکعب تعلق دارد. مناطق سراب و دشت میاندوآب نیز از نظر میزان مصرف آب وضعیتی تقریباً مشابه (حدود ۳۰۰ میلیون متر مکعب) را دارند. از نظر صرفه جویی قابل حصول، بیشترین درصد صرفه جویی به دشت ارومیه با ۳۹٪ تعلق دارد. پس از آن منطقه نقده و اشنویه با ۳۱٪، میاندوآب با ۲۵٪ و سراب با ۲۰٪ در رتبه های بعدی قرار می گیرند. لذا می توان بیان کرد که با اعمال شیوه های صحیح آبیاری و مدیریت آب در مزرعه، بیشترین راندمان در کاهش مصرف به دشت ارومیه و سپس نقده و اشنویه تعلق دارد. همچنین می توان نتیجه گرفت که بهترین وضعیت از نظر بهینه بودن مصرف آب به منطقه سراب تعلق دارد.

از نظر حجم آب قابل صرفه جویی، بیشترین مقدار به دشت ارومیه با ۱۹۷ میلیون متر مکعب اختصاص دارد. پس از آن نیز نقده و اشنویه و دشت میاندوآب با حدود ۷۰ میلیون متر مکعب در جایگاه های بعدی قرار می گیرد. به عبارت دیگر، با اعمال شیوه صحیح آبیاری (آبیاری به مقدار مورد نیاز گیاه)، دشت ارومیه بیشترین میزان کاهش در مصرف آب را خواهد داشت؛ حجمی که معادل مجموع میزان صرفه جویی در دیگر مناطق عمده حوضه (دشت میاندوآب، سراب و نقده و اشنویه) خواهد بود. لذا اعمال شیوه های اصلاح آبیاری و کاهش مصرف آب در منطقه ارومیه نسبت به دیگر مناطق حوضه از الویت بالاتری برخوردار است. پس از ارومیه نیز منطقه نقده و اشنویه و دشت میاندوآب و نهایتاً منطقه سراب در جایگاه های بعدی قرار می گیرند.

۶- نتیجه گیری و جمع بندی

در پژوهش صورت گرفته نرخ تبخیر و تعرق واقعی حوضه طی هفت ماه آوریل تا اکتبر در سال ۲۰۱۰ میلادی با استفاده از الگوریتم بیان انرژی SEBAL و تصاویر سنجنده MODIS برآورد شده است. در گام بعد با استفاده از نتایج بیان انرژی، مقادیر مصرف آب در حوضه برآورد شده و نهایتاً حجم و درصد آب قابل صرفه جویی در مناطق زراعی عمده حوضه مورد محاسبه قرار گرفته است. مهم ترین نتایج به دست آمده از این مطالعه عبارت اند از:

- اگرچه از بین ۴ ایستگاه موجود در حوضه آبریز، تنها اطلاعات مربوط به ۱۶ روز از ماه های آوریل، می، ژوئن و جولای ایستگاه مزرعه تحقیقاتی دانشگاه تبریز در اختیار بوده است، اما تنها داده های چهار تاریخ بیست و هفتم ماه می، سوم ماه ژوئن، نهم ماه جولای و سی ام ماه جولای برای انجام مقایسه بین نرخ تبخیر و تعرق واقعی محاسبه شده با مقادیر ثبت شده قابل استفاده است. مقایسه نتایج نشان می دهد که مقادیر لایسیمتر در سه روز کمتر، و در یک روز بیشتر از مقادیر محاسباتی توسط الگوریتم می باشند. با توجه به تعداد محدود روزهای مشابه نمی توان نتیجه گیری کلی نسبت به بیش یا کم برآورد نمودن روش SEBAL در تخمین مقادیر ارتفاع تبخیر و تعرق واقعی ارائه نمود اما با این حال با مقایسه بین مقادیر تبخیر و تعرق واقعی تخمین زده شده با استفاده از روش SEBAL و ۴ داده تبخیر و تعرق واقعی اندازه گیری شده توسط لایسیمتر نتایج نشان داد که مقادیر تخمین دارای $RMSE=1/3$ mm و $MBE=0/53$ می باشد و همبستگی قابل قبولی بین مقادیر اندازه گیری و تخمین وجود دارد ($R=0/92$).

- بیشترین مقدار میانگین ماهانه ارتفاع تبخیر و تعرق واقعی در اراضی کشاورزی طی هفت ماه مورد بررسی، در ماه ژوئیه و معادل با ۶۳ میلی متر بوده است. همچنین روند تغییرات در طول این هفت ماه به صورت زنگوله ای بوده به طوری که از ماه آوریل تا ژوئیه افزایش و سپس تا ماه اکتبر کاهش یافته و در این ماه به ارتفاع ۲۷ میلی متر رسیده است.
- بر اساس نقشه های ارتفاع تبخیر و تعرق واقعی ماهانه، توزیع مکانی نواحی بیشینه منطبق با نقشه کاربری اراضی و مناطق با پوشش گیاهی می باشند. این نواحی شامل بخش غربی دریاچه ارومیه، بخش هایی از شرق و شمال شرق دریاچه و نواحی کشاورزی جنوب دریاچه می شود.
- با استفاده از داده های ایستگاه های سینوپتیک موجود در حوضه، نقشه های بارش حوضه در هر ماه به کمک درون یابی بین نقاط ایستگاه ها محاسبه گردید. بر اساس نتایج به دست آمده میانگین ارتفاع بارش طی هفت ماه مورد بررسی از ماه آوریل تا اکتبر که جزء ماه های گرم سال محسوب می شوند، مطابق انتظار بسیار کمتر از ماه های دیگر سال می باشد و فقط ۱۳ درصد از کل بارندگی سال ۲۰۱۰ میلادی طی هفت ماه میلادی آوریل تا اکتبر رخ داده است.
- با تعیین توزیع مکانی ارتفاع تبخیر و تعرق واقعی هر حوضه آبریز با استفاده از الگوریتم SEBAL اصلاح شده و تعیین حد آستانه مناسب، می توان به نوعی به روش معکوس توزیع مکانی اراضی کشاورزی باغی و زراعی منطقه را بدست آورد.
- با استفاده از نقشه های ارتفاع تبخیر و تعرق واقعی ماهانه محاسبه شده به روش SEBAL اصلاح شده و مقادیر تبخیر ماهانه از سطح دریاچه ارومیه، بیلان بخار حوضه آبریز دریاچه ارومیه در هر ماه به صورت جداگانه به تفکیک و به صورت مجموع هفت ماه از ماه آوریل تا اکتبر محاسبه شده است. بر اساس منطق محاسبات نواحی با مقادیر نزدیک تر به عدد یک، نرخ تبخیر و تعرق واقعی نزدیک تر به تبخیر از سطح دریاچه را دارا هستند. بنابراین، اعمال سیاست های کاهش مصرف (مانند اصلاح الگوی کشت، اصلاح الگوی آبیاری و بهبود سیستم آبیاری) به ازای سطح زیر کشت یکسان در اراضی باغی موجود در کرانه غربی دریاچه ارومیه و پس از آن اراضی موجود در حاشیه سیمینه رود، زرينه رود و دشت میان دو آب اثربخشی بیشتری به نسبت سایر اراضی در جهت احیای دریاچه دارد.
- با توجه به محاسبات صورت گرفته در مورد میزان نیاز آبی و مصرف محصولات مختلف زراعی و باغی مربوط به کشت آبی در دشت ارومیه، دشت میان دو آب، سراب و نقده و اشنویه، و با در نظر گرفتن

میزان بارش در محدوده های مورد نظر، می توان در حجم آبیاری انجام شده صرفه جویی قابل ملاحظه ای انجام داد. از نظر درصد صرفه جویی قابل حصول، بیشترین مقدار به دشت ارومیه با ۳۹٪ تعلق دارد. پس از آن نقره و اشنویه با ۳۱٪ و میاندوآب با ۲۵٪ در رتبه های بعدی قرار گرفته اند. نهایتاً کمترین درصد صرفه جویی به سراب با ۲۰٪ تعلق دارد. از نظر حجم آب، بیشترین حجم قابل صرفه جویی به دشت ارومیه با ۱۹۷ میلیون متر مکعب اختصاص دارد. حجمی که معادل مجموع میزان صرفه جویی در دیگر مناطق عمده حوزه آبریز ارومیه (دشت میاندوآب، سراب و نقره و اشنویه) خواهد بود. پس از آن نیز نقره و اشنویه و دشت میاندوآب با حدود ۷۰ میلیون متر مکعب در جایگاه بعدی قرار گرفته اند. از آنجا که تأمین صددرصدی آب مورد نیاز گیاه نیز با توجه به ارزش اقتصادی محصولات منطقی به نظر نمی رسد، می توان با صرفه جویی بیش از این مقدار نیز همچنان به برداشت محصولی اقتصادی دست یافت.

۷- فهرست مراجع

باقری هارونی، م. ح. (۱۳۹۰). ارزیابی فن آوری سنجش از دور در برآورد مؤلفه های بیلان آب در مقیاس حوضه ای، با تأکید بر میزان برداشت خالص آب زیرزمینی (مطالعه موردی حوضه آبریز دریاچه ارومیه). پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی آب: دانشگاه تربیت مدرس.

سازمان حفاظت محیط زیست. (۱۳۸۹). برنامه مدیریت جامع دریاچه ارومیه.

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

قاجارنیا، ن. لیاقت، ن. دانش کار آراسته، پ. (۲۰۱۴). صحت سنجی داده های بارندگی ایستگاه های غیر ثبات سازمان هواشناسی و تماب در حوضه آبریز دریاچه ارومیه. نشریه علمی-پژوهشی حفاظت منابع آب و خاک، ۴، ۹۱-۱۰۹.

مرکز تحقیقات سنجش از دور دانشگاه صنعتی شریف. (۱۳۹۳). بررسی تحلیلی کاربری اراضی (کشاورزی آبی) در حوزه آبخیز دریاچه ارومیه با استفاده از تصاویر ماهواره ای لندست (سال های ۱۹۷۶، ۲۰۱۰ و ۲۰۱۳ میلادی).

موسسه تحقیقات آب (WRI) و DLG. (۱۳۸۵). مدیریت جامع منابع آب برای حوضه آبریز دریاچه ارومیه. موسسه تحقیقات آب، پژوهشکده مطالعات و تحقیقات منابع آب. (۱۳۹۲). بررسی تغییر شرایط محیطی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه (کاربری اراضی).

Allen, R., Tasumi, M., Trezza, R., Waters, R., & Bastiaanssen, W. (2002). Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL)—Advanced training and Users Manual. *Kimberly: Idaho Implementation*

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. *FAO, Rome, 300, D05109*

Allen, R.G., Tasumi, M., & Trezza, R. (2007). Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)—Model. *Journal of irrigation and drainage engineering, 133, 380-394*

- ASCE-EWRI (2005). The ASCE standardized reference evapotranspiration equation: ASCE-EWRI Standardization of Reference Evapotranspiration Task Committee Report. In: ASCE Reston
- Bastiaanssen, W. (2000). SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. *Journal of hydrology*, 229, 87-100
- Bastiaanssen, W., Chemin, Y., Ahmad, M.-u.-D., & Asif, S. (1999). Patterns of crop evaporation in the Indus Basin, recognized from the NOAA-AVHRR Satellite
- Bastiaanssen, W., Pelgrum, H., Wang, J., Ma, Y., Moreno, J., Roerink, G., & Van der Wal, T. (1998). A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL).: Part 2: Validation. *Journal of hydrology*, 212, 213-229
- Bastiaanssen, W.G.M. (1995). *Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain: A remote sensing approach under clear skies in Mediterranean climates*. Landbouwniversiteit te Wageningen
- Batra, N., Islam, S., Venturini, V., Bisht, G., & Jiang, L. (2006). Estimation and comparison of evapotranspiration from MODIS and AVHRR sensors for clear sky days over the Southern Great Plains. *Remote Sensing of Environment*, 103, 1-15
- Bos, M.G., Kselik, R.A., Allen, R.G., & Molden, D. (2008). *Water requirements for irrigation and the environment*. Springer Science & Business Media
- Cooper, P. (1969). The absorption of radiation in solar stills. *Solar energy*, 12, 333-346
- Delju, A., Ceylan, A., Piguet, E., & Rebetez, M. (2013). Observed climate variability and change in Urmia Lake Basin, Iran. *Theoretical and applied climatology*, 111, 285-296
- Du, J., Song, K., Wang, Z., Zhang, B., & Liu, D. (2013). Evapotranspiration estimation based on MODIS products and surface energy balance algorithms for land (SEBAL) model in Sanjiang Plain, Northeast China. *Chinese geographical science*, 23, 73-91
- Duffle, J., & Beckman, W. (1980). *Solar engineering of thermal processes* Wiley and Sons. *New York*

Granger, R. (1997). Comparison of surface and satellite-derived estimates of evapotranspiration using a feedback algorithm. In, *Proceedings of 3rd International Workshop on Application of Remote Sensing in Hydrology* (pp. 71-81)

Hafeez, M.M. (2003). *Water accounting and productivity at different spatial scales in a rice irrigation system: a remote sensing approach*. Cuvillier

Hemakumara, H., Chandrapala, L., & Moene, A.F. (2003). Evapotranspiration fluxes over mixed vegetation areas measured from large aperture scintillometer. *Agricultural water management*, 58, 109-122

Hong, S.-h., Hendrickx, J.M., & Borchers, B. (2009). Up-scaling of SEBAL derived evapotranspiration maps from Landsat (30m) to MODIS (250m) scale. *Journal of hydrology*, 370, 122-138

Huntingford, C., Verhoef, A., & Stewart, J. (2000). Dual versus single source models for estimating surface temperature of African savannah. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 4, 185-191

Kustas, W.P., & Norman, J.M. (1999). Evaluation of soil and vegetation heat flux predictions using a simple two-source model with radiometric temperatures for partial canopy cover. *Agricultural and Forest Meteorology*, 94, 13-29

Nishida, K., Nemani, R.R., Running, S.W., & Glassy, J.M. (2003). An operational remote sensing algorithm of land surface evaporation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108

Norman, J.M., Kustas, W.P., & Humes, K.S. (1995). Source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes in observations of directional radiometric surface temperature. *Agricultural and Forest Meteorology*, 77, 263-293

Pengra, B. (2012). The drying of Iran's Lake Urmia and its environmental consequences. *UNEP-GRID, Sioux Falls, UNEP Global Environmental Alert Service (GEAS)*

Sánchez, J., Kustas, W., Caselles, V., & Anderson, M. (2008). Modelling surface energy fluxes over maize using a two-source patch model and radiometric soil and canopy temperature observations. *Remote Sensing of Environment*, 112, 1130-1143

- Schneider, U., Fuchs, T., Meyer-Christoffer, A., & Rudolf, B. (2008). Global precipitation analysis products of the GPCC. *Global Precipitation Climatology Centre (GPCC), DWD, Internet Publikation, 112*
- Smith, M. (1992). *CROPWAT: A computer program for irrigation planning and management*. Food & Agriculture Org.
- Starks, P.J., Norman, J.M., Blad, B.L., Walter-Shea, E.A., & Walthall, C.L. (1991). Estimation of shortwave hemispherical reflectance (albedo) from bidirectionally reflected radiance data. *Remote Sensing of Environment, 38*, 123-134
- Su, Z. (2002). The Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions, 6*, 85-100
- Su, Z., Schmugge, T., Kustas, W., & Massman, W. (2001). An evaluation of two models for estimation of the roughness height for heat transfer between the land surface and the atmosphere. *Journal of Applied Meteorology, 40*, 1933-1951
- Tasumi, M., Trezza, R., Allen, R.G., & Wright, J.L. (2005). Operational aspects of satellite-based energy balance models for irrigated crops in the semi-arid US. *Irrigation and Drainage Systems, 19*, 355-376
- Van de Griend, A., & Owe, M. (1993). On the relationship between thermal emissivity and the normalized difference vegetation index for natural surfaces. *International Journal of Remote Sensing, 14*, 1119-1131
- Vidal, A., & Perrier, A. (1989). Technical note Analysis of a simplified relation for estimating daily evapotranspiration from satellite thermal IR data. *International Journal of Remote Sensing, 10*, 1327-1337
- Webb, R., Eckert, E., & Goldstein, R. (1971). Heat transfer and friction in tubes with repeated-rib roughness. *International Journal of Heat and Mass Transfer, 14*, 601-617
- Zwart, S.J., & Bastiaanssen, W.G. (2007). SEBAL for detecting spatial variation of water productivity and scope for improvement in eight irrigated wheat systems. *Agricultural water management, 89*, 287-296



*Sharif University of Technology
Remote Sensing Research Center*



*Urmia Lake Restoration National
Committee (ULRNC)*

Estimation of Evapotranspiration, water saving and agricultural water consumption at Urmia Lake Basin, 2010

Technical Project Director:

Dr. Somayeh Sima

By:

Peyman Saemian
Mohammad Faridzad
Soheila Youneszadeh
Maryam Emadzadeh
Ehsan Jalilvand
Hamid Farahmand
Mercedeh Taheri

April 2015