

چکیده

در این تحقیق با استفاده از الگوریتم توازن انرژی برای سطح زمین (سبال) برآورد تبخیر- تعرق اراضی تحت پوشش حوضه هیدرولوژیک رودخانه زاینده رود، دشت گلپایگان و دامنه فریدن در استان اصفهان صورت گرفت. سبال یک الگوریتم سنجش از دور است که تعادل انرژی سطحی لحظه‌ای را برای هر پیکسل از یک تصویر ماهواره‌ای انجام می‌دهد. این الگوریتم با استفاده از دمای سطحی، بازتابندگی سطحی، شاخص‌های وضعیت پوشش گیاهی و روابط درونی آنها شارهای سطحی را برای انواع پوشش‌های سطح زمین برآورد می‌نماید. تصاویر ماهواره‌ای که در این تحقیق استفاده شدند، تصویر ETM^+ با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر برای باندهای انعکاسی و ۶۰ متر برای باند حرارتی و تصویر مودیس با قدرت تفکیک مکانی ۱۰۰۰، ۵۰۰، ۲۵۰ متر می‌باشند. پس از انجام تصحیحات لازم (هندسی و توپوگرافی)، پردازش هر کدام از مناطق به صورت مجزا انجام گرفت و پراکنش‌های مربوط به آلبیدوی سطحی، شاخص‌های گیاهی، گسیلندگی سطح، دمای سطحی، تشعشعات ورودی و خروجی، شار گرمای خاک و شار گرمای محسوس برای هر منطقه در تصاویر مودیس و ETM^+ به دست آمد، در نهایت تبخیر- تعرق روزانه در روز برداشت تصاویر محاسبه شد. تبخیر- تعرق واقعی برآورد شده به روش سبال در تصویر ETM^+ با تبخیر- تعرق واقعی به دست آمده از روش فائو پنمن-مانتیث (با در نظر گرفتن ضریب گیاهی) در روز برداشت تصویر ETM^+ مقایسه شد و مشاهده شد تبخیر- تعرق برآورد شده در دو حالت مذکور برای مزارع برنج لجنانات تنها ۰/۲۲ میلی‌متر بر روز اختلاف دارند. نتایج نشان داد که مقادیر برآورد شده (در ابعاد منطقه‌ای) در تصاویر مودیس و ETM^+ نزدیک به هم است به طوری که میانگین تبخیر- تعرق برآورد شده برای هر منطقه در این دو تصویر نزدیک به هم می‌باشد. با استفاده از روش لین تحلیل حساسیت بر روی پارامترهای موجود در سبال صورت گرفت و مشخص شد که پارامترهایی چون شاخص نرمال شده اختلافات گیاهی، شاخص سطح برگ و سرعت باد کمترین حساسیت و تابش موج کوتاه ورودی و اختلاف دمای هوای نزدیک سطح بیشترین حساسیت را در مدل دارا می‌باشند. این تحلیل حساسیت در تصویر ETM^+ انجام شد.

کلمات کلیدی: تبخیر- تعرق، سبال، مودیس، ETM^+ ، سنجش از دور، اصفهان.

فصل اول

مقدمه

۱-۱ مقدمه

با توجه به این نکته که آب مایه تشکیل حیات و پیشرفت تمدن ها می باشد و به طور روز افزونی نیاز بشر به آب در بخش های مختلف کشاورزی، صنعت و اجتماعی و ... افزایش می یابد و همچنین منابع آب در حال کاهش می باشد، بحران آب یکی از بزرگترین چالش های جوامع امروزی است و سبب می شود که در استفاده و بهره برداری از آب، دقت و مدیریت مناسب لحاظ شود. از آنجایی که کشور ما در منطقه خشک و نیمه خشک جهان قرار گرفته و بارندگی آن حدود یک سوم متوسط جهانی و تبخیر حدود سه برابر متوسط جهانی می باشد، بحران آب به شدت ایران را تهدید می کند. حدود ۹۴ درصد از آب مصرفی، به بخش کشاورزی اختصاص دارد و بیش از ۶۵ درصد از این آب در اثر راندمان پایین طی روند آبرسانی و آبیاری از دسترس خارج می شود که ارزش این تلفات به بیش از ۶۳ میلیارد دلار می رسد [۱۱]. با استفاده از باقی مانده آب، فقط ۵ درصد از مساحت کل کشور تحت کشت قرار می گیرد در حالی که در صورت وجود آب کافی حدود ۳۰ درصد از اراضی کشور قابل کشت است [۱۴]. در این بین فرایندی با نام تبخیر و تعرق^۱ (ET) دارای اهمیت بالایی است. در سال ۱۹۹۰ مجله تایم اعلام کرد که مشکل جهانی کمبود آب در تمامی مصارف وجود دارد به طوری که در آینده نزدیک در بعضی مناطق ممکن است جنگ رخ دهد [۳۲]. در این میان تعیین تبخیر و تعرق از اصول مدیریت صحیح می باشد. حدود ۹۰ درصد وزن تازه برخی گیاهان را آب و ۹۹ درصد آب مصرفی گیاهان صرف تبخیر و تعرق می شود [۳ و ۸].

۲-۱ تبخیر و تعرق

فرایند تبخیر و تعرق شامل دو بخش تبخیر^۱ و تعرق^۲ است.

تبخیر فرایندی است که طی آن آب از حالت مایع به بخار تبدیل می شود و از سطح تبخیر محو می شود. تبخیر از سطوح مختلف مثل دریاچه ها، رودخانه ها، جاده ها، خاک ها و گیاهان مرطوب صورت می گیرد. برای تغییر حالت مولکول های آب از حالت مایع به بخار، نیاز به انرژی است. تشعشع مستقیم خورشید و در یک مقیاس کوچکتر، دمای هوای اطراف این انرژی را فراهم می کند. نیروی محرکه ای که بخار آب را از سطح تبخیر جدا می کند اختلاف فشار بخار آب بین سطح تبخیر و محیط اطراف می باشد. در طی تبخیر، محیط اطراف به تدریج اشباع شده و فرایند کند، و اگر رطوبت هوا در اتمسفر منتقل نشود تبخیر متوقف خواهد شد. جایگزینی هوای اشباع با هوای خشک وابستگی زیادی به سرعت باد دارد. از این رو تشعشع خورشیدی، دمای هوا، رطوبت هوا و سرعت باد پارامترهای هواشناسی هستند که هنگام محاسبه تبخیر مورد ملاحظه قرار می گیرند.

تعرق شامل تبخیر آب مایع بافت های گیاهی و انتقال بخار به اتمسفر است. گیاهان آب خود را از روزنه ها از دست می دهند. آب به همراه مواد غذایی، بوسیله ریشه ها جذب می شوند و به داخل گیاه منتقل می شوند. تبخیر و تعرق در برگ انجام می شود و انتقال بخار به اتمسفر توسط روزنه های دهان دار کنترل می شود. اکثر قریب به اتفاق آب گیاه به وسیله تعرق از دست می رود و بخش کوچکی به وسیله گیاه مصرف می شود. تعرق نیز مانند تبخیر، به تأمین انرژی، گرادیان فشار بخار و باد بستگی دارد.

تبخیر و تعرق همزمان اتفاق می افتد به طوری که تشخیص آنها از یکدیگر کار ساده ای نیست. وقتی که گیاه در مراحل اولیه رشد است اکثر آب توسط تبخیر از خاک از دست می رود. ولی اگر گیاه رشد کند و سطح خاک را به طور کامل بپوشاند، تعرق فرایند غالب است.

تبخیر و تعرق معمولاً بر اساس میلی متر بر واحد زمان بیان می شود. مقدار آب از دست رفته از سطح زیر کشت، بر اساس واحد عمق آب بیان می شود. واحد زمان می تواند ساعت، روز، ماه و یا حتی کل دوره رشد یا سال باشد [۲۲].

۳-۱ تخمین تبخیر و تعرق

تخمین تبخیر و تعرق برای یک گیاه خاص ماهیت بسیار پیچیده ای دارد. تعدادی از فاکتورهای تأثیرگذار بر تبخیر و تعرق گیاه عبارتند از: نوع گیاه، مرحله رشد، آب و هوا، آب خاک، سطح کود، نوع و

۱-Evaporation

۲-Transpiration

شرایط خاک، رقابت با علف های هرز، پوشش گیاهی، آفات و بیماری ها. از دیدگاه عملی، توجه مستقیم بر همه این فاکتورها در هنگام تخمین تبخیر و تعرق غیر ممکن است. معمولاً تخمین های تبخیر و تعرق به تأثیرات آب و هوا، گیاه و آب خاک توجه می کند. تأثیرات ویژگی های گیاهی بر تبخیر و تعرق یک گیاه خاص، بسیار مهم است و عموماً بوسیله ضرایب گیاهی که به طور تجربی به دست می آیند، محاسبه می شوند [۳۲].

تبخیر و تعرق در حالت کلی به دو صورت محاسبه می شود: روش مستقیم و روش غیر مستقیم. در روش مستقیم از اصل بیلان جرمی در یک حجم کنترل شده برای محاسبه تبخیر و تعرق استفاده می شود. انواع لایسیمترها از وسایلی هستند که در این روش کاربرد دارند. ولی با توجه به هزینه و مشکلات احداث و همچنین خطاهای موجود، لایسیمترها معمولاً در کارهای تحقیقاتی و یا واسنجی دیگر روش های محاسبه تبخیر و تعرق به کار می روند.

در روش غیر مستقیم ابتدا تبخیر و تعرق گیاه مرجع محاسبه و سپس با استفاده از ضرایب گیاهی، تبخیر و تعرق گیاه به دست می آید. این روش به چهار گروه کلی تقسیم می شود [۹].

۱- روش آئرودینامیک: این روش بر اساس پخشیدگی مولکولی و پخشیدگی متلاطم می باشد که باعث انتقال مولکول های آب از گیاه به هوا می شود. با توجه به هزینه زیاد و نیاز به افراد ماهر و همچنین مشکلاتی که در تعیین پارامترهای موجود در آن وجود دارد فقط در شرایط تحقیقاتی کاربرد دارد.

۲- روش بیلان انرژی: با استفاده از بیلان انرژی سطح زمین به تعیین تبخیر- تعرق مرجع می پردازد که همانند روش های آئرودینامیک فقط در شرایط تحقیقاتی کاربرد دارند.

۳- روش های ترکیبی: ترکیبی از روش های آئرودینامیک و توازن انرژی می باشد که ابتدا توسط پنمن ارائه شد و به مرور زمان روش های مختلفی با توجه به آن ارائه شد که عبارتند از: پنمن- فائو، پنمن- رایت، پنمن- بوسینگر، پنمن- کیمبرلی، پنمن- مانتیث، فائو- پنمن- مانتیث.

۴- روش های تجربی: این روش ها با توجه به پارامترهای مؤثر بر تبخیر- تعرق مرجع به دست آمده که هر کدام در شرایط اقلیمی و دوره های زمانی خاصی کاربرد دارند. از جمله این روش ها عبارتند از: ترنت وایت، بلانی- کریدل، جنسن- هیز، هارگریوز- سامانی و ...

تعدادی از این روش ها به صورت زیر می باشند:

روش بلانی کریدل:

این روش از رابطه (۱-۱) جهت تخمین تبخیر- تعرق گیاه مرجع چمن استفاده می کند [۸].

$$ET_o = a + b[P(0.46T + 8.13)] \quad (1-1)$$

که در آن:

ET_0 تبخیر- تعرق گیاه مرجع چمن (میلی متر بر روز)، P ضریب مربوط به طول روز، T متوسط ماهانه درجه حرارت (درجه سانتیگراد). ضرایب a و b بستگی به حداقل رطوبت نسبی هوا، نسبت ساعات واقعی آفتاب به حداکثر ساعات آفتابی ممکن و سرعت باد در روز دارد.
روش جنسن- هیز اصلاح شده:

این روش از رابطه (۲-۱) جهت تخمین تبخیر- تعرق گیاه مرجع استفاده می کند [۸].

$$ET_0 = C_T(T - T_X) \cdot K_T \cdot R_a \cdot TD^{0.5} \quad (2-1)$$

که در آن:

ET_0 تبخیر- تعرق گیاه مرجع چمن (میلی متر بر روز)، T میانگین روزانه دما (درجه سانتیگراد)، R_a تابش برون زمینی (میلی متر آب)، TD تفاوت متوسط دمای ماکزیمم و مینیمم روزانه. ضرایب C_T و T_X بستگی به فشار بخار اشباع به ازاء ماکزیمم روزانه دمای هوا در گرمترین ماه سال، فشار بخار اشباع به ازاء می نیمم روزانه دمای هوا در گرمترین ماه سال و ارتفاع از سطح دریا دارند. ضریب K_T بستگی به TD و درصد ساعات تابش آفتاب دارد.
روش هارگریوز- سامانی:

در این روش از رابطه ای مشابه با روش جنسن- هیز اصلاح شده استفاده می شود [۸].

$$ET_0 = 0.0135 \cdot K_T \cdot R_a \cdot TD^{0.5} (T + 17.8) \quad (3-1)$$

تمامی پارامترها مشابه با روش جنسن- هیز اصلاح شده می باشد.

روش فائو- پنمن- مانتیث:

رابطه (۴-۱) که رابطه ترکیبی است جهت تخمین تبخیر- تعرق گیاه مرجع در این روش به کار می رود. گیاه مرجع چمن فرضی با ارتفاع ۱۲ سانتیمتر و آلبیدوی ۲۳ درصد و مقاومت روزنه ای ۷۰ ثانیه بر متر می باشد [۸].

$$ET_0 = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \left[\frac{890}{T + 273} \right] U_2 (e_a - e_d)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 U_2)} \quad (4-1)$$

که در آن:

ET_0 تبخیر- تعرق گیاه مرجع چمن (میلی متر بر روز)، R_n تابش خالص در سطح پوشش گیاهی (مگا ژول بر متر مربع بر روز)، T متوسط دمای هوا در ارتفاع ۲ متری (درجه سانتیگراد)، U_2 سرعت باد در ارتفاع ۲ متری (متر بر ثانیه)، $e_a - e_d$ کمبود فشار بخار در ارتفاع ۲ متری (کیلو پاسکال)، Δ شیب منحنی فشار بخار (کیلو پاسکال بر درجه سانتیگراد)، γ ضریب رطوبتی (کیلو پاسکال بر درجه سانتیگراد) و G شار گرمای به داخل خاک (مگا ژول بر متر مربع بر روز) می باشد.

۱-۴ شرح و بیان مسأله

کشور ما ایران در منطقه خشک و نیمه خشک جهان واقع شده است به طوری که متوسط سالانه بارندگی ایران حدود یک سوم بارندگی سالانه کره زمین است و متوسط سالانه تبخیر ایران حدود سه برابر تبخیر سالانه کره زمین است. استفاده بی رویه و آلودگی های منابع آب باعث مشکل های زیادی در مدیریت منابع آب شده است. با توجه به سهم ۹۴ درصدی بخش کشاورزی از منابع آب، برای جلوگیری و خروج از بحران آب نیاز به مدیریت مناسب کشاورزی و منابع آب است. یکی از پارامترهای مهم در این راستا، تعیین تبخیر و تعرق می باشد. تخمین تبخیر و تعرق در طرح های آبیاری، کمبود آب مخازن، محاسبه بیلان، تعیین رواناب و مطالعات هواشناسی، ضروری است [۴۷]. نقشه های منطقه ای تبخیر و تعرق اطلاعات حساسی درباره فعل و انفعالات بین زمین و اتمسفر فراهم می کند که از آن ها می توان برای موارد زیر استفاده کرد [۴۶]:

۱- تعیین مکان، زمان و مقدار آبی که توسط تبخیر و تعرق به اتمسفر می رود.

۲- تعیین تأثیر خشکی برای پیش بینی خشکسالی

۳- ارزیابی مناسب از عملکرد سیستم آبیاری

۴- پیش بینی بهتر آب و هوا

تبخیر تابعی از ویژگی های خاک، آب و هوا، کاربری اراضی، وضعیت گیاهی و توپوگرافی منطقه است که این پارامترها در زمان و مکان متغیر هستند. بنابراین تخمین و یا تعیین مقادیر شاخص این پارامترها در یک منطقه مشکل می باشد [۵۱]. روش های اندازه گیری تبخیر از سطح زمین از جمله همبستگی ادی^۱ [۴۴]، نسبت باون^۲ و لایسیمتر وزنی [۳۱]، برای کاربرد پیوسته در فاصله های مناسب در منطقه، بسیار پر خرج و وقت گیر است [۳۵ و ۵۰]. همچنین چون این اندازه گیری ها نقطه ای بوده، به خاطر شرایط متغیر منطقه ای، قابل تعمیم به حوضه های بزرگ نمی باشد [۷]. بنابراین تخمین بوسیله سنجش از دور^۳ در زمین های وسیع بسیار تواناتر می باشد.

سنجش از دور عبارت است از بدست آوردن اطلاعات مستند از یک شیء یا یک پدیده، از راه دور و بدون تماس فیزیکی با آن ها. سنجش از دور نمونه ای از مشاهدات است که با استفاده از برهمکنش امواج الکترومغناطیسی در باندهای طیفی مختلف اجسام انجام می شود [۱۳].

۱- Eddy correlation

۲- Bowen ratio

۳- Remote sensing

سنجش از دور در علوم فراوانی از جمله جغرافیا، زیست شناسی، هواشناسی، کشاورزی، مدیریت منابع آب و ... کاربرد دارد. دسترسی آسان و ارزان به داده ها و دقت بالای آن ها و رقومی بودن و جامع و گسترده بودن تصاویر که از تنوع طیفی فراوانی برخوردار می باشند، از جمله ویژگی هایی است که سنجش از دور را نسبت به دیگر روش های تأمین اطلاعات ارجح نموده است.

با استفاده از الگوریتم های موجود در سنجش از دور که مربوط به تبخیر و تعرق می باشند، گام بزرگی را می توان در مدیریت منابع آب برداشت. از جمله این الگوریتم ها، الگوریتم توازن انرژی برای سطح زمین (سبال)^۱ است.

سبال یک الگوریتم سنجش از دور است که تعادل انرژی سطحی لحظه ای را برای هر پیکسل از یک تصویر ماهواره ای انجام می دهد [۲۸ و ۲۹ و ۳۰]. این الگوریتم با استفاده از دمای سطحی، بازتابندگی سطحی، شاخص های وضعیت پوشش گیاهی و روابط درونی آنها شارهای سطحی را برای انواع پوشش های سطح زمین برآورد می نماید. روش سبال را می توان در مباحثی از قبیل تخمین بیلان آب [۵۲]، مطالعات تعیین عملکرد آبیاری [۵۳] و مطالعات پیش بینی آب و هوا استفاده کرد [۳۵ و ۵۸]. از عوامل ارجحیت الگوریتم سبال نسبت به دیگر الگوریتم هایی که با استفاده از تصاویر ماهواره ای جهت تخمین تبخیر و تعرق به کار می روند، عبارتند از:

- ۱- داده های میدانی کمی نیاز دارد.
- ۲- دارای مفهوم فیزیکی است و بنابراین قابلیت کاربرد برای اقلیم های مختلف را دارد.
- ۳- نیازی به نقشه کاربری اراضی ندارد.
- ۴- نیازی به دخالت داده های مورد نیاز مدل های هیدرولوژی ندارد.
- ۵- شیوه کار مرحله بندی شده است.

۱-۵ تاریخچه

روشهای مختلفی با ترکیب کردن تصاویر ماهواره ای و داده های هواشناسی برای مناطق وسیع به منظور تخمین تبخیر و تعرق واقعی به کار برده شد. تحقیقات انجام شده در سال های گذشته، منجر به شناسایی الگوریتم های قوی تر و مناسب تری در جهت استفاده در مدیریت آب شده است.

جکسون و همکاران (۱۹۷۷) با به دست آوردن تبخیر و تعرق بوسیله داده سنجش از دور با استفاده از گرماسنج مادون قرمز در مزرعه گندم در آریزونا پیشگام استفاده سنجش از دور هستند [۴۱]. سپس روش

۱- Surface Energy Balance Algorithm for Land, SEBAL

سبال در تحقیقات مختلفی برای ارزیابی تبخیر و تعرق استفاده شده است که از آن جمله می توان به مطالعات صورت گرفته در کشورهای اسپانیا، ایتالیا، ترکیه، پاکستان، هند، سریلانکا، مصر، چین و غیره اشاره نمود.

برآورد تبخیر و تعرق محلی، در مزرعه نیشکر با استفاده از داده های سنجنده TM^1 بر اساس مفهوم شاخص $VITT^2$ توسط آقای یانگ و همکاران (۱۹۹۷) صورت گرفت. رطوبت قابل دسترس و سپس مقدار تبخیر و تعرق با استفاده از دمای سطح و شاخص $NDVI^3$ گرفته شده از داده های سنجنده TM محاسبه شد. در انتها مقادیر برآورد شده با نتایج مدل بیلان آب مقایسه گردید. این مطالعه نشان داد که با استفاده از داده های سنجنده TM بر اساس مفهوم شاخص $VITT$ می توان نوعی خاص از برآورد تبخیر و تعرق را از مزرعه نیشکر در مقیاس محلی معرفی کرد [۶۰].

باستینسن و همکاران (۱۹۹۸) تخمینهای سبال را با داده های مزرعه ای در اسپانیا و چین مقایسه کردند. در ۸۵ درصد موارد، اختلاف ها در محدوده قابل قبول قرار داشت. مقدار ریشه میانگین مربعات خطای جزء تبخیری برای فواصل کمتر از ۱۰۰ متر، بین ۰/۱ و ۰/۲ متغیر بوده و با تلفیق چندین بازه و ایجاد فواصل کمتر از یک کیلومتر، خطای کلی به ۵ درصد کاهش یافت. همچنین در تحقیقی که در دلتای رود نیل در مصر انجام شد، اختلاف داده های مزرعه ای با سبال در هفتصد هزار هکتار منطقه تحت کشت، در مقدار شار تبخیری روزانه ۵ درصد بود. با توجه به این نتایج، استفاده از سبال را در مطالعات هیدرولوژی و شبکه های آبیاری توصیه کردند [۳۰].

مدینا و همکاران (۱۹۹۸) از مدل سبال به عنوان یک مدل معقول یاد کرده و از آن در جنوب اسپانیا استفاده نموده و نتایج آن را ارزیابی و واسنجی نمودند و بیان نمودند که نتایج دارای تطبیق قابل قبولی با داده های زمینی دارد. مدل سبال نیاز کمی به پارامترهای آزمایشگاهی دارد لذا دارای کاربرد وسیعی است. نتایج نشان داد که محاسبه تبخیر- تعرق با استفاده از تصاویر ماهواره ای لندست دارای دقت بالایی برای شرایط منطقه مورد مطالعه بوده است. تبخیر در دو منبع بزرگ آب موجود در تصویر که شامل تالاب های زونار و کوردیلا است، با مقادیر به دست آمده از معادله پنمن و هارگریوز مقایسه شد که حداکثر اختلاف ۹/۵٪ را نشان داد [۴۷].

۱-Thematic Mapper

۲-Vegetation Index / Temperature Trapezoid

۳-Normalized Differences Vegetation Index

باستینسن (۲۰۰۰) عملکرد سبال در تعیین تبخیر و تعرق و شار گرمایی محسوس را با مقادیر بدست آمده توسط روش های همبستگی ادی و Scintillometer مورد مقایسه قرار داد که در نتیجه دقت سبال مورد تأیید قرار گرفت [۲۶].

حافظ و همکاران (۲۰۰۲) اقدام به انجام یک تحقیق به منظور امکان سنجی استفاده از داده های چند سنجنده مختلف در محاسبه تبخیر- تعرق با استفاده از روش سبال کردند. محققین مذکور از تصاویر سنجنده های لندست ۷، استر و مودیس استفاده کردند. از این داده ها برای مطالعه در دوره های مختلفی از فصل خشک ۲۰۰۱ در فیلیپین استفاده شد. با مقایسه نتایج حاصل از سنجنده های مختلف با هم و با داده های ایستگاه اقلیم شناسی اعلام کردند که از سه سنجنده مذکور می توان در محاسبه تبخیر- تعرق واقعی در مناطق استوایی استفاده کرد. که در این بین نتایج حاصل از سنجنده لندست دارای کمترین انحراف از روش پنمن- مانیتث می باشد [۳۸].

ویمالاسوریا و چاندراپالا (۲۰۰۳) با استفاده از تصاویر NOAA-AVHRR اقدام به استفاده از الگوریتم سبال نمودند. این محققین برای یک دوره ۱۲ ماهه اقدام به پردازش تصاویر ۸۸ روز نموده و نتایج را با تبخیر و تعرق واقعی اندازه گیری شده توسط دستگاه Scintillometer مقایسه کردند. نتایج نشان داد که اختلاف بین مقادیر حاصله از سبال و مقادیر اندازه گیری شده در دوره ده روزه و ماهانه به ترتیب ۱۷ درصد و ۱ درصد می باشد. لذا نتیجه گرفتند که استفاده از اطلاعات ماهواره ای برای برآورد تبخیر و تعرق مناسب بوده و آن را توصیه کردند [۳۳].

هماکومارا و همکاران (۲۰۰۳) اقدام به مقایسه مقادیر تبخیر و تعرق به دست آمده از Scintillimeter و Net radiometer را با مقادیر تبخیر و تعرق محاسبه شده از الگوریتم سبال نمودند. این محققین از تصاویر NOAA-AVHRR در سریلانکا استفاده کردند. متوسط انحراف مقادیر تبخیر و تعرق به دست آمده از سبال برای دوره ۱۰ روزه ۱۷ درصد و برای دوره ماهانه ۱ درصد بود. بنابراین استفاده از سبال را توصیه کردند [۳۹].

آلن و همکاران (۲۰۰۳) اقدام به مقایسه تبخیر و تعرق حاصل از الگوریتم سبال با استفاده از تصاویر لندست با مقادیر لایسیمتری منطقه آیداهو کرده و نتایج قابل قبولی بدست آوردند. مقدار اختلاف میانگین ماهانه گزارش شده ۱۶ درصد و در بازه فصلی ۴ درصد بوده است [۲۱].

باستینسن و همکاران (۲۰۰۵) به بررسی دقت سبال در شرایط مختلف آب و هوایی و در مقیاس مزرعه ای و حوزه ای پرداختند. برای شرایط رطوبت خاک و شرایط گیاهی رایج در منطقه، صحت در مقیاس

مزرعه ای ۸۵ درصد برای دوره یک روزه تا ۹۵ درصد برای دوره فصلی می باشد. دقت تعیین تبخیر و تعرق سالانه در حوزه های بزرگ به طور متوسط به ۹۶ درصد رسید [۲۷].

ترز و همکاران (۲۰۰۶) از سبال برای مطالعه تبخیر و تعرق از تصاویر لندست ۵ در ونزوئلا استفاده کردند. آنها اعلام کردند که سبال را می توان به عنوان یک روش عملی برای تخمین تبخیر و تعرق واقعی در مناطقی که اطلاعات زمینی محدودیت دارند استفاده کرد [۵۶].

جویت و کنگو (۲۰۰۶) در یک تحقیق، یک شبکه کنترل در زیر حوضه Postshini (جنوب آفریقا) ایجاد و از الگوریتم سبال برای بدست آوردن تبخیر و تعرق توسط تصاویر ماهواره ای لندست ۷ استفاده کردند. با کاربرد الگوریتم سبال، یک نقشه تبخیر و تعرق روزانه برای کل مکان های تصویر در نیمه دوم مارس ۲۰۰۱ بدست آمد. در مناطقی که تراکم محصولات کشاورزی زیادی داشتند مقدار تبخیر و تعرق و NDVI بالایی به دست آمد. مقایسه بین تخمین های سبال و مقادیر ثبت شده در ایستگاه های آب و هوایی Bergville در یک روز و برای یک پیکسل انجام شد. با وجود اختلاف مشاهده شده بین تخمین های تبخیر- تعرق از داده های آب و هوایی و تخمین های سبال، امکان استفاده از سبال در زیر حوضه Postshini و حوضه رودخانه Thukela مخصوصا در تعیین مقدار آب مصرفی گیاهان برای مدیریت منابع آب حوضه رودخانه، موجود می باشد [۴۵].

کیمورا و همکاران (۲۰۰۶) تحقیقی را در شمال شرقی دشت لسی چین که فرسایش بادی و آبی شدید است و مقدار ریزش شن و خاک در رودخانه زیاد است، انجام دادند. از این رو ایجاد یک سیستم کاربری اراضی را لازم دیدند تا چرخه آب در حوضه رودخانه برای محدود کردن فرسایش خاک و استفاده از منابع تجدید پذیر زمینی را ضمانت کند. در همین راستا، بیلان آب مخصوصا در مورد تبخیر و تعرق را در حوضه رودخانه در شمال شرقی دشت لسی مورد بررسی قرار دادند. الگوریتمی توسط روش سبال برای تخمین تبخیر و تعرق معرفی شده که بوسیله مطالعه داده های مزرعه ای تأیید شده است [۴۳].

حافظ و همکاران (۲۰۰۷) با استفاده از هفت تصویر مودیس در تاریخ های مختلف در طی تابستان ۲۰۰۲ برای حوزه رودخانه زرد چین به وسیله سبال به تخمین نیاز آبی گیاه پرداختند. تبخیر و تعرق واقعی ۲۴ ساعته با توجه به تبخیر و تعرق لحظه ای به دست آمد. سپس به وسیله داده های زمینی، نقشه تبخیر و تعرق واقعی فصلی تهیه شد. نتایج نشان داد که همبستگی بین تبخیر و تعرق واقعی در تاریخ های مختلف وجود دارد. سپس نتایج، با تبخیر و تعرق پتانسیلی که در ایستگاه اقلیم شناسی تهیه شده مقایسه شدند که وجود اختلاف ۵ درصد، نتایج سبال را تأیید کرد [۳۸].

کمپور و همکاران (۲۰۰۷) از روش سبال برای تهیه نقشه تبخیر و تعرق در حوضه Volta White در غنا (غرب آفریقا)، در شروع و پایان فصل خشک با استفاده از تصاویر مودیس و لندست استفاده کردند. هدف آنها از این کار استفاده از نقشه های مستقل کاربری اراضی زمین برای تأیید و ارزیابی روش سبال برای تهیه نقشه های تبخیر و تعرق با قدرت مکانی ۳۰ متر (لندست) و ۱۰۰۰ متر (مودیس) بود. نتایج این مطالعه نشان می دهد که سبال یک الگوریتم مناسب برای تهیه نقشه های تبخیر و تعرق در مناطق استوایی که اندازه گیری های زمینی کم هستند یا اصلاً وجود ندارند، می باشد [۳۵].

حافظ و همکاران (۲۰۰۷) در پروژه ای واقع در غرب آفریقا برای تعیین تبخیر و تعرق از الگوریتم سبال و تصاویر نوآ استفاده کردند. در طول حدود ۱۰۰۰ کیلومتر از حوزه، از سه تشعشع سنج استفاده شد که با مقایسه مقادیر آن با مقادیر شار گرمای محسوس که در سبال محاسبه می شود، قابل قبول بودن عملکرد سبال را تأیید کرد [۳۷].

ایمرزیل و همکاران (۲۰۰۸) با به کارگیری سبال و سوات به بررسی بیلان آب حوزه ای در جنوب هند پرداختند. مدلی برای تهیه بیلان ماهانه آب، ارزیابی عملکرد گیاه و مصرف آب گیاه برای سال آبی ۲۰۰۴-۲۰۰۵ واسنجی شد. در نتیجه مشخص شد که تبخیر و تعرق بزرگترین عامل اتلاف آب در حوضه بوده و کل تبخیر و تعرق ۳۸۱۷۲ میلیون متر مکعب (۸۳۵ میلی متر) بوده که ۴۲ درصد از آن غیر مفید بوده است [۴۰].

از روش های دیگر برآورد تبخیر و تعرق با استفاده از سنجش از دور می توان به تحقیقی که در سال ۲۰۰۸ توسط سیمونوکس و همکاران در اراضی کشاورزی بخش مرکزی کشور مراکش صورت گرفت اشاره کرد. در این تحقیق از شاخص تفاضل نرمال شده گیاهی (NDVI) استخراج شده از داده های سنجنده TM برای تخمین تبخیر- تعرق اراضی کشاورزی استفاده شد، بدین ترتیب که از ۸ تصویر سنجنده TM، NDVI استخراج و برای مشخص کردن دوره رویشی محصولات یکساله که اکثراً گندم بود بکار گرفته شد. ضریب گیاهی با استفاده از NDVI در ۸ مرحله از رشد محاسبه گردید. تبخیر و تعرق مرجع با استفاده از فرمول پنمن-مانتیث بدست آمد، سپس تبخیر و تعرق واقعی از روش فائو محاسبه شد [۵۴].

اکبری (۱۳۸۳) در تحقیقی جهت بهبود مدیریت آبیاری مزارع، با استفاده از تصاویر لندست و الگوریتم سبال اقدام به تهیه نقشه تبخیر و تعرق نمود. بر اساس برآوردهای تبخیر و تعرق روزانه، سطوح کشت شاداب از مناطقی که با تنش آبی مواجه شده اند تفکیک گردید [۱].

عمادزاده (۱۳۸۶) در طی روند تخمین کارایی مصرف آب در مقیاس حوزه ای در زیر حوزه قره سو، از الگوریتم سبال جهت تعیین تبخیر و تعرق ماهانه گیاه استفاده نمود. این کار با استفاده از تصاویر AVHRR پیش پردازش شده انجام شد. در نتیجه اعلام شد که غیر از ماه های آوریل، می، آگوست و سپتامبر در سایر ماه ها اختلاف زیادی بین مقادیر سنجش از دور و رابطه پنمن - مانیتث وجود دارد [۱۰].

وظیفه دوست (۱۳۸۶) جهت ارزیابی خشکسالی کشاورزی در منطقه برخوار اصفهان، از الگوریتم سبال جهت تعیین تبخیر و تعرق گیاه استفاده نمود. این کار با استفاده از تصاویر مودیس و استر انجام شد [۱۸].

۱-۶ اهمیت و ارزش و کاربرد تحقیق

تبخیر تابعی از ویژگی های خاک، آب و هوا، کاربری اراضی، وضعیت گیاهی و توپوگرافی منطقه است که این پارامترها در زمان و مکان متغیر هستند. بنابراین تخمین و یا تعیین مقادیر شاخص این پارامترها در یک منطقه مشکل می باشد. روش های اندازه گیری تبخیر از سطح زمین از جمله همبستگی ادی، نسبت باون و لایسیمتر وزنی، برای کاربرد پیوسته در فاصله های مناسب در منطقه، بسیار پر خرج و وقت گیر است. همچنین چون این اندازه گیری ها نقطه ای بوده، به خاطر شرایط متغیر منطقه ای، قابل تعمیم به حوضه های بزرگ نمی باشد. بنابراین تخمین بوسیله تصاویر ماهواره ای و سنجش از دور در زمین های وسیع بسیار تواناتر می باشد. سنجش از دور با بهره گیری از الگوریتم های متعدد در برآورد میزان تبخیر و تعرق دارای پتانسیل بالایی برای مدیریت منابع آب در سطح وسیع می باشد. استفاده از داده های ماهواره ای با توجه به محدودیت ایستگاه هواشناسی و بالا بودن هزینه جمع آوری اطلاعات زمینی بسیار ضروری است.

۱-۷ اهداف تحقیق

اهداف این تحقیق در موارد زیر خلاصه می شود:

- ۱- برآورد توزیع مکانی تبخیر و تعرق با استفاد از الگوریتم توازن انرژی سطح زمین (سبال) و تصاویر ماهواره ای لندست ۷ و مودیس.
- ۲- مقایسه مقادیر برآورد شده تصاویر لندست با مودیس، همچنین مقایسه تبخیر- تعرق به دست آمده از روش سبال با فرمول پنمن - مانیتث.
- ۳- تحلیل حساسیت پارامترهای تأثیر گذار بر الگوریتم سبال در برآورد تبخیر و تعرق، با استفاده از تصویر ماهواره ای لندست ۷ با قدرت تفکیک مکانی مناسب.

۸-۱ ساختار تحقیق

در ادامه این فصل در بخش ۱-۹ الگوریتم توازن انرژی سطح زمین (سبال) شرح داده می شود. توصیف پارامترهای موجود در سبال و نحوه به دست آوردن پارامترها در این بخش آمده است. مطالب فصل دوم عبارت است از معرفی و بررسی مناطق مورد مطالعه در استان اصفهان، داده های مورد استفاده در این تحقیق شامل: تصویر های استفاده شده و مشخصات باند های آن ها- نقشه رقوم ارتفاعی منطقه- داده های آب و هوایی اخذ شده از ایستگاه ها هواشناسی، پیش پردازش تصاویر و روش استفاده شده برای محاسبه آلبیدوی سطحی، دمای سطحی و شاخص های گیاهی در این تحقیق برای تصاویر لندست ۷ و مودیس. همچنین در انتهای این فصل روش تحلیل حساسیت بر روی پارامترهای مؤثر در سبال آمده است. در فصل سوم پراکنش پارامترهای موجود در سبال به ترتیب از آلبیدوی سطحی تا تبخیر- تعرق روزانه، برای هر پیکسل از تصاویر لندست ۷ و مودیس انجام می شود سپس مقادیر برآورد شده در تصاویر با یکدیگر (در ابعاد منطقه ای) و با فرمول فائو پنمن- ماننیت مقایسه می شوند و در انتها تحلیل حساسیت بر روی پارامترها صورت می گیرد. در فصل آخر نتیجه گیری کلی از این تحقیق و پیشنهادهای مقتضی ارائه شده است. نرم افزارهای مورد استفاده در این تحقیق عبارتند از:

Excel, Idrisi klimanjaro, ARC GIS, ERDAS IMAGINE

۹-۱ الگوریتم توازن انرژی سطحی برای زمین (سبال)

سبال یک الگوریتم پردازش تصویری است که با استفاده از حداقل داده های زمینی تبخیر و تعرق را بصورت لحظه ای، ۲۴ ساعته و فصلی محاسبه می کند. الگوریتم توازن انرژی سطحی برای زمین (سبال)، الگوریتم نسبتا جدیدی است که در اکثر نقاط دنیا برای برآورد تبخیر و تعرق و سایر شارهای گرمایی در سطح مورد استفاده قرار می گیرد و نتایج نسبتا رضایت بخشی را ارائه داده است. این مدل با استفاده از دمای سطحی، بازتابندگی سطحی، NDVI و روابط درونی آنها شارهای سطحی را برای انواع پوشش های سطح زمین برآورد می کند.

روش سبال شامل الگوریتم مناسبی است که بیلان کامل انرژی را حل می کند.

$$\lambda ET = R_n - G - H \quad (5-1)$$

که در آن:

λET : شار گرمای نهان^۱ (انرژی که برای تبخیر آب به کار می رود)

R_n : تشعشع خالص^۲ در سطح

G : شار گرمای خاک^۳

H : شار گرمای محسوس^۴ به هوا

تمامی پارامترها بر حسب وات بر متر مربع هستند.

R_n که از آلبیدوی^۵ سطحی، تابش موج کوتاه ورودی، تابش موج بلند خروجی و ورودی و قابلیت انتقال^۶ محاسبه می شود. شار گرمای خاک (G) با استفاده از شاخص های گیاهی^۷ و تشعشع خالص محاسبه می شود. شار گرمای محسوس (H) با توجه به چندین فاکتور تعیین می شود که عبارتند از: دمای سطحی^۸ و سرعت باد که از داده های زمینی می باشند، زبری سطح^۹ که محاسبه می شود و اختلاف دمای دمای سطح با هوا، که از شاخص های گیاهی تعیین می شود. باقی محاسبات به صورت ویژه برای هر پیکسل در تصویر محاسبه می شوند. محاسبات گرمای محسوس با استفاده از تصحیح ثبات اتمسفری مانین- ابوکف اصلاح می شود. در نهایت بوسیله شرایط شناخته شده در یک نقطه مرجع، H که از

۱-Latent heat flux

۲-Net radiation

۳-Soil heat flux

۴-Sensible heat flux

۵-Albedo

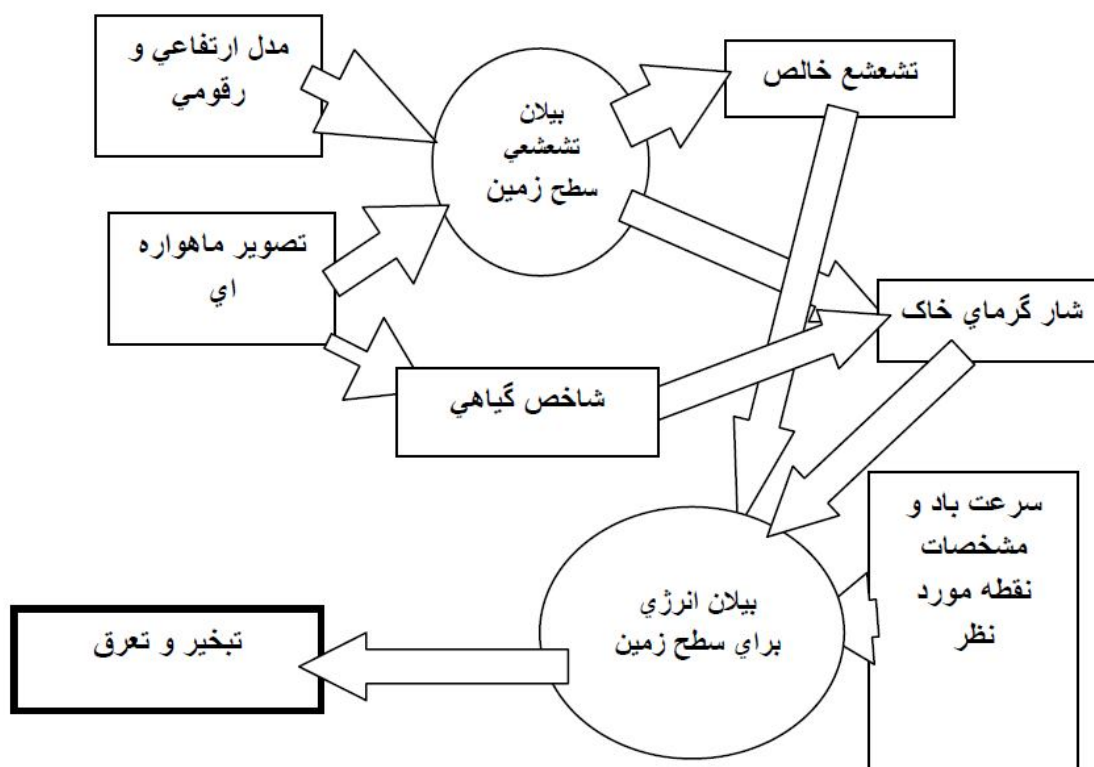
۶-Transmittance

۷-Vegetation index

۸-Surface temperature

۹-Surface roughness

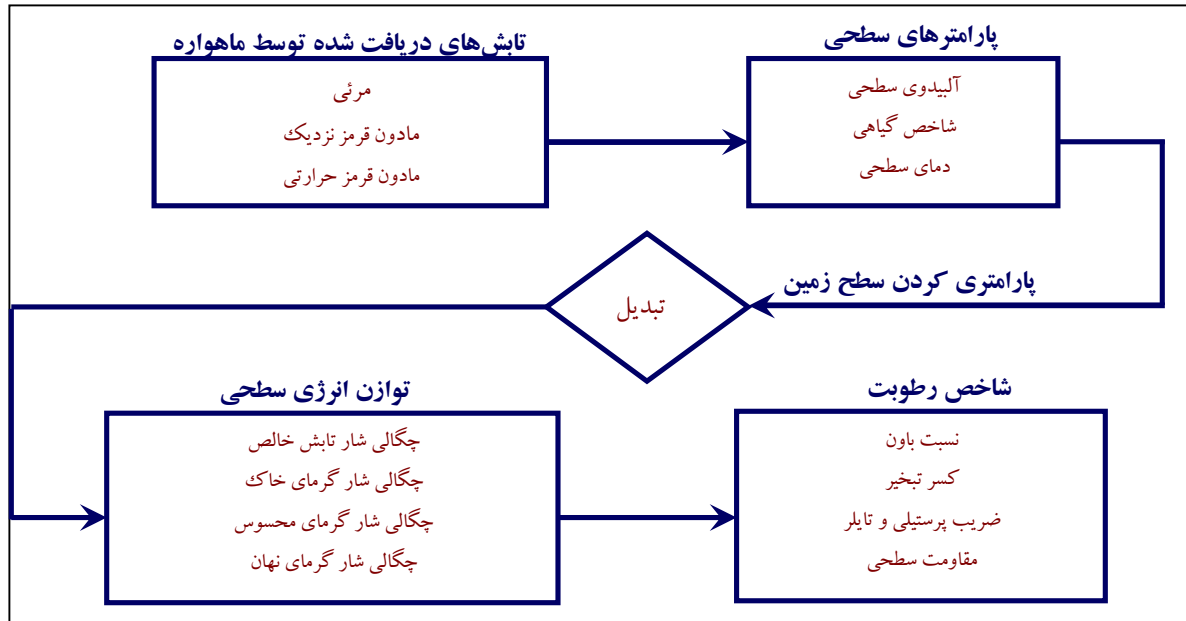
تصویر ماهواره ای بدست می آید، محدود می شود. در آخر تبخیر و تعرق از تقسیم λET بر گرمای نهان تبخیر^۱ (λ) بدست می آید. سبال محاسبات اولیه خود از تبخیر و تعرق را برای لحظه عبور ماهواره انجام می دهد. تبخیر و تعرق برای دوره های ۲۴ ساعته تصاویر، بر اساس استفاده از کسر تبخیر (EF)^۲ که در یک فضای پیکسل در پیکسل محاسبه می شود، می باشد. کسر تبخیر به صورت نسبت تبخیر و تعرق به R_n-G است. سبال فرض می کند که کسر تبخیر در طول روز ثابت است. این فرض با توجه به یکسری مطالعات مزرعه ای بدست آمده است. در شکل زیر شمایی از الگوریتم سبال آمده است.



شکل (۱-۱) شمای کلی از الگوریتم سبال [۲۴].

۱-Latent heat vaporization

۲-Evaporation friction



شکل (۲-۱) مراحل محاسباتی الگوریتم سبال به صورت خلاصه.

معادله (۵-۱) اجزای بیلان انرژی را نشان می‌دهد. برای برآورد تبخیر و تعرق (λET) سایر اجزای معادله بیلان انرژی در لحظه تصویر برداری باید تعیین شود. در قسمت‌های زیر نحوه محاسبه پارامترهای موجود در معادله بیلان انرژی (الگوریتم سبال) آمده است.

۱-۹-۱ تابش خالص (R_n)

شار تابش خالص در سطح زمین با استفاده از تمامی شارهای تابشی ورودی و خروجی از سطح به دست می‌آید. میزان تابش خالص در سطح زمین و اجزای آن از رابطه زیر تعیین می‌گردد.

$$R_n = (1 - \alpha)R_{S\downarrow} + R_{l\downarrow} - R_{l\uparrow} - (1 - \varepsilon_0)R_{l\downarrow} \quad (6-1)$$

که در آن α آلیدوی سطحی، $R_{S\downarrow}$ تابش موج کوتاه ورودی (۰/۳ تا ۳ میکرومتر) بر حسب وات بر متر مربع، $R_{l\downarrow}$ تابش موج بلند ورودی (۳ تا ۱۰۰ میکرومتر) بر حسب وات بر متر مربع، $R_{l\uparrow}$ تابش موج بلند خروجی بر حسب وات بر متر مربع، ε_0 گسیلندگی سطحی عریض باند می‌باشد. بنابراین تابش خالص عبارت از اختلاف بین جریان تابش ورودی و خروجی بوده و معیاری از مقدار انرژی موجود در سطح زمین به شمار می‌رود.

در ادامه هر یک از اجزای معادله (۶-۱) مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲-۹-۱ آلیدوی سطحی (α)

آلیدو نسبتی از تشعشع تابیده شده خورشیدی است که به سطح زمین برخورد کرده و بازتابیده می‌شود.

آلبدو و مقدار آن وابسته به نوع عارضه زمینی، جنس و میزان جذب تشعشع خورشیدی از سوی اجسام بر روی زمین می باشد.

آلبدو بر اساس الگوریتم سبال به دو روش قدیمی و جدید برآورد می گردد.

الف- روش قدیم محاسبه آلبدو

- قابلیت بازتاب طیفی^۱ ($R_{(band)}$)

در این مرحله بازتابندگی برای هر پیکسل در باندهای ۱ تا ۵ و ۷ تصاویر لندست ۷ محاسبه می شود.

$$R_{(band)} = \frac{E_{out(band)}}{E_{in(band)}} \quad (۷-۱)$$

$E_{out(band)}$: انرژی خروجی باند که در بالای اتمسفر توسط ماهواره اندازه گیری می شود.

$E_{in(band)}$: انرژی ورودی باند در بالای اتمسفر.

انرژی ورودی بر اساس مقادیر تئوری برای طول موج های متغیر تشعشعات خورشیدی محاسبه می شود.

$$E_{in(band)} = G_{sc(band)} \times \cos \theta \times dr \quad (۸-۱)$$

$G_{sc(band)}$: مقادیر ثابت خورشیدی برای هر باند که بر حسب وات بر متر مربع بر میکرومتر می باشد.

$\cos \theta$: کسینوس زاویه ورودی تابش خورشید و بر حسب رادیان می باشد.

dr : معکوس فاصله نسبی زمین و خورشید است که بدون بعد می باشد و مطابق با رابطه زیر تعریف شده است:

$$dr = 1 + 0.0033 \times \cos \left(DOY \frac{2\pi}{365} \right) \quad (۹-۱)$$

DOY شماره روز ژولینی از ابتدای سال میلادی می باشد. مقادیر dr بین ۰/۹۷ تا ۱/۳۰ قرار دارند، واحد عبارت داخل پرانتز رادیان می باشد.

انرژی خروجی از رابطه زیر به دست می آید.

$$E_{out(band)} = \left(\alpha + (b - \alpha) \frac{DN}{255} \right) \pi \quad (۱۰-۱)$$

α و b مقادیر ثابت و DN شماره راقومی^۲ پیکسل تصویر ماهواه ای است.

مقادیر G_{sc} ، α و b برای تصاویر لندست ۷ (ETM^+)^۳ در جدول (۱-۱) آمده است. G_{sc} بر حسب وات بر متر مربع بر میکرومتر و مقادیر α و b بر حسب وات بر متر مربع در استرادیان^۴ در میکرومتر می باشند.

مقادیر α ، b و G_{sc} برای باندهای مختلف لندست ۷ در جدول (۱-۱) آمده است

۱- Spectral reflectance

۲-Digital number

۳-Enhanced Thematic Mapper plus

۴-Steradian

[۲۴]

جدول (۱-۱) مقادیر α ، b و G_{sc} برای باندهای لندست ۷.

باندها ضرایب	باند ۱	باند ۲	باند ۳	باند ۴	باند ۵	باند ۷
G_{sc}	۱۹۷۰	۱۸۴۳	۱۵۵۵	۱۰۴۷	۲۲۷/۱	۸۰/۵۳
	-۶/۲	-۶/۴	-۵	-۵/۱	-۱	-۰/۳۵
b	۱۹۱/۶	۱۹۶/۵	۱۵۲/۹	۱۵۷/۴	۳۱/۰۶	۱۰/۸

-آلبیدوی بالای جو (α_{toa})

آلبیدوی بالای جو نسبتی از تشعشعات بازتابیده ورودی در سطح می باشد و به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\alpha_{toa} = \sum (C_{(band)} \times R_{(band)}) \quad (11-1)$$

$C_{(band)}$ ضریب وزنی برای هر باند است که از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$C_{(band)} = \frac{G_{sc(band)}}{\sum G_{sc(band)}} \quad (12-1)$$

که در آن $G_{sc(band)}$ ثابت خورشیدی باندها می باشد.

مقادیر $C_{(band)}$ برای باندهای مختلف لندست ۷ در جدول (۲-۱) آمده است [۲۴].

جدول (۲-۱) مقادیر $C_{(band)}$ برای لندست ۷

باند ها	باند ۱	باند ۲	باند ۳	باند ۴	باند ۵	باند ۷
C	۰/۲۹۳	۰/۲۷۴	۰/۲۳۱	۰/۱۵۶	۰/۰۳۴	۰/۰۱۲

-آلبیدوی سطحی (α)

از آنجا که عبوردهی اتمسفری در محاسبه α_{toa} نیامده است، تصحیح مقدار آلبیدو بوسیله عبوردهی در این مرحله انجام می شود.

$$\alpha = \frac{\alpha_{toa} - \alpha_{path-radiance}}{\tau_{sw}^2} \quad (13-1)$$

$\alpha_{path-radiance}$: آلبیدوی مسیر که معمولاً بین ۰/۰۲۵ تا ۰/۰۴ است. باستانسن مقدار ۰/۰۳ را برای مدل سبال پیشنهاد کرد.

τ_{sw}^2 : قابلیت انتقال دو طرفه و بدون بعد است.

مقدار عمومی برای قابلیت انتقال یک طرفه در آسمان صاف و شرایط نسبتاً خشک اتمسفری برابر است با:

$$\tau_{sw} = 0.75 + 2 \times 10^{-5} \times z \quad (14-1)$$

که در آن Z ارتفاع از سطح دریا بر حسب متر می باشد.

ب- روش جدید محاسبه آلیدو

در روش جدید که از سال ۲۰۰۴ مورد استفاده قرار گرفت، روند محاسبه آلیدو به ترتیب زیر می باشد [۲۳].

- تعیین قابلیت بازتابش در بالای اتمسفر ($\rho_{t,b}$)

در قدم اول برای محاسبه آلیدوی سطح، می بایست قابلیت بازتابش در بالای اتمسفر ($\rho_{t,b}$) برآورد گردد. قابلیت بازتابش در بالای اتمسفر ($\rho_{t,b}$) همان قابلیت بازتاب طیفی ($R_{(band)}$) است، که در بخش قبل نحوه محاسبه آن توضیح داده شد.

- تعیین قابلیت بازتابش سطح ($\rho_{s,b}$)

دومین قدم در محاسبه آلیدو، تعیین بازتابش سطح است. قابلیت بازتابش سطح ($\rho_{s,b}$) از رابطه زیر به دست می آید:

$$\rho_{s,b} = \frac{\rho_{t,b} - \rho_{a,b}}{\tau_{in,b} \times \tau_{out,b}} \quad (15-1)$$

که در آن:

$\rho_{s,b}$: قابلیت بازتابش سطح

$\rho_{t,b}$: قابلیت بازتابش در بالای اتمسفر (مقدار آن بین صفر و یک متغیر می باشد).

$\rho_{a,b}$: بازتابش کاذب ثبت شده در ماهواره که از پراکنش امواج در هوا به وجود آمده اند نه از انعکاس امواج از سطح زمین (مقدار آن بین صفر و یک متغیر می باشد).

$\tau_{in,b}$: گسیلندگی اتمسفری وارد شده به اتمسفر از خورشید به سمت زمین در باند b.

$\tau_{out,b}$: گسیلندگی اتمسفری ارسال شده از سطح زمین به داخل اتمسفر در باند b.

در معادله بالا قابلیت بازتابش در بالای اتمسفر معلوم بوده، بازتابش کاذب نیز توسط جدول (۳-۱) که آلن در سال ۲۰۰۵ ارائه کرد قابل استفاده می باشد، گسیلندگی اتمسفری وارد شده به اتمسفر و خارج شده از آن به ترتیب توسط روابط (۱۶-۱) و (۱۹-۱) قابل محاسبه خواهند بود:

$$\tau_{in,b} = C_1 \exp \left[\frac{C_2 P_{air}}{K_t \cos \theta_h} - \frac{C_3 W + C_4}{\cos \theta_h} \right] + C_5 \quad (16-1)$$

در رابطه بالا،

C_1 تا C_5 ضرایبی هستند که مقادیر آنها در جدول (۳-۱) درج گردیده است، P_{air} فشار اتمسفر (کیلو

پاسکال)، W آب قابل بارش (میلی متر)، K_t ضریب کدر بودن (شفافیت) که مقدار پیش فرض آن ۱ می باشد و $\cos\theta_h$ زاویه خورشیدی از نقطه نادیر در یک سطح افقی است. P_{air} از رابطه زیر بدست می آید:

$$P = 101.3 \left(\frac{293 - 0.0065Z}{293} \right)^{5.26} \quad (17-1)$$

در رابطه بالا Z ارتفاع از سطح دریا بر حسب متر است.

W از اطلاعات رادیوسوند و یا اطلاعات دمائی می بایست محاسبه گردد (بر حسب میلی متر). از رابطه زیر نیز می توان W را بدست آورد:

$$W = 0.14e_a P_{air} + 2.1 \quad (18-1)$$

e_a فشار بخار نزدیک سطح می باشد بر حسب کیلو پاسکال.

گسیلندگی اتمسفری ارسال شده از سطح زمین به داخل اتمسفر نیز از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$\tau_{out,b} = C_1 \exp \left[\frac{C_2 P_{air}}{K_t} - \frac{C_3 W + C_4}{1} \right] + C_5 \quad (19-1)$$

پارامترهای این معادله همانند رابطه قبلی می باشد. در جدول (۳-۱) مقادیر ضرایب C_1 تا C_5 و نیز $\rho_{a,b}$ برای باندهای مختلف ارائه شده است [۲].

جدول (۳-۱)، مقادیر مورد استفاده در تعیین آلیدو در تصاویر ماهواره لندست.

	باند ۱	باند ۲	باند ۳	باند ۴	باند ۵	باند ۷
C_1	۰/۹۸۷	۲/۳۱۹	۰/۹۵۱	۰/۳۷۵	۰/۲۳۴	۰/۳۶۵
C_2	-۰/۰۰۰۷۱	-۰/۰۰۰۱۶	-۰/۰۰۰۳۳	-۰/۰۰۰۴۸	-۰/۰۰۱۰۱	-۰/۰۰۰۹۷
C_3	۰/۰۰۰۰۳۶	۰/۰۰۰۰۱۰۵	۰/۰۰۰۰۲۸	۰/۰۰۰۵۰۱۸	۰/۰۰۰۴۳۳۶	۰/۰۰۰۴۲۹۶
C_4	۰/۰۰۸۸	۰/۰۴۳۷	۰/۰۸۷۵	۰/۱۳۵۵	۰/۰۵۶	۰/۰۱۵۵
C_5	۰/۰۷۸۹	-۱/۲۶۹۷	۰/۱۰۱۴	۰/۶۶۲۱	۰/۷۷۵۷	۰/۶۳۹
$\rho_{a,b}$	۰/۰۷۲۶	۰/۰۵۹۷	۰/۰۳۴۴	۰/۰۱۹۳	۰/۰۱۸	۰/۰۱۵۲

-تعیین آلیدو سطح (α)

در آخرین مرحله بازتابش سطح با استفاده از رابطه زیر به دست می آید.

$$\alpha = \sum_{b=1}^7 [\rho_{s,b} W_b] \quad (20-1)$$

در این رابطه، W_b ضریب وزنی که بخشی از تمام انرژی خورشیدی را در نظر می گیرد، که جمع آن برای ۶ باند مقدار یک خواهد شد. مقدار این عامل برای باندهای مختلف در جدول (۴-۱) ارائه شده