

برآورد تبخیر و تعرق واقعی و بهره‌وری آب گندم با استفاده از الگوریتم سبال و

تصاویر ماهواره‌ای لندست ۵ در دشت قزوین

مهدی ملک پور، حسین بابازاده^{*}، فریدون کاوه و نیازعلی ابراهیمی پاک

دانشجوی دکتری، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، گروه مهندسی آب، تهران، ایران.

m.malekpour61@yahoo.com

دانشیار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، گروه مهندسی آب، تهران، ایران.

h_babazadeh@hotmail.com

دانشیار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، گروه مهندسی آب، تهران، ایران.

flmkaveh@yahoo.com

دانشیار، موسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.

nebrahimipak@yahoo.com

چکیده

بخش کشاورزی بزرگترین مصرف کننده آب شناخته شده است. با توجه به محدودیت منابع آب لازم است اصلاح بهره‌وری آب در این بخش صورت گرفته و مفهوم بهره‌وری آب در بخش کشاورزی در بین سیاستگذاران بخش آب و غذا در سطح وسیع و در حوضه آبریز دشت‌ها مورد توجه قرار گیرد. سنجش از دور ایزاری است که در دهه‌های اخیر در ارزیابی و مدیریت آب و خاک مورد استفاده قرار گرفته است. در این تحقیق نیز از این ابزار برای برآورد بهره‌وری آب استفاده شده است. مقادیر تبخیر و تعرق و ماده خشک تولیدی در دشت قزوین با استفاده از الگوریتم سیال و برای ۵ تصویر گرفته شده از ماهواره لندست ۵ محاسبه شد. نتایج اجرای الگوریتم سیال در هر پنج تصویر یا داده‌های لایسبمتر زهکش‌دار موجود در منطقه مورد ارزیابی قرار گرفت که مقدار ضریب تبیین (R^2) آنها ۰/۹۹۴۸ و میانگین نفاصل مطلق آنها ۰/۴۴۶ میلی‌متر بر روز به دست آمد. این نتیجه نشان از دقت مناسب روش سنجش از دور در تخمین تبخیر و تعرق در سطح دشت دارد. علاوه بر این، نتایج نشان داد که بهره‌وری آب در سطح دشت از ۰/۱۸ تا ۱/۳۵ کیلوگرم بر مترمکعب متغیر است. میزان بهره‌وری آب برای گندم در سطح دشت یا تصاویر ماهواره‌ای لندست ۵ به طور متوسط ۰/۷۳ کیلوگرم بر مترمکعب و از طریق لایسبمتر گندم، ۰/۸۵ کیلوگرم بر مترمکعب به دست آمد که هم‌بند را تأیید می‌کنند.

واژه‌های کلیدی: تفاوت نرمال شده شاخص پوشش گیاهی، لایسبمتر، سنجش از دور.

^۱ آدرس نویسنده مسئول: تهران، انتهای اتوبان شهیدستاری، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، گروه مهندسی آب.

* دریافت: دی ۱۳۹۴ پذیرش: آذر ۱۳۹۵

مقدمه

آب مصرفی با احتساب تلفات آبیاری (WP_{ETQ}) و بهره‌وری اقتصادی آب آبیاری (WP_E) (مولدن، ۱۹۷۷).

سینگ (۲۰۰۵) با استفاده از مدل SWAP کارائی مصرف آب گیاهان زراعی در منطقه سیرسای کشور هندوستان را در مقیاس‌های مختلف و شکل‌های مختلف با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و سامانه اطلاعات جغرافیایی تعیین نمود. حالت‌های کارائی مصرف آب تعیین شده شامل نسبت عملکرد محصول به مقدار آب مصرف شده در فرایند تعرق، تبخیر و تعرق بعلاوه نفوذ عمقی از مزرعه و نشت از کانال‌های انتقال آب بود. در نتایج بدست آمده تغییرات زیادی در مقادیر بهره‌وری آب (WP) گیاهان مختلف مناطق و حتی گیاهان یکساله در مناطق مختلف وجود داشت. به عنوان نمونه، بهره‌وری آب بر پایه تبخیر و تعرق (WP_{ET}) گندم، بین کشاورزان منطقه سیرسای سال‌های ۲۰۰۱-۲۰۰۲ بین ۱/۲۲ تا ۱/۵۶ متغیر بود.

وظیفه‌دوست و همکاران (۲۰۰۸) در بررسی بهره‌وری آب کشاورزی در مقیاس مزرعه در منطقه برخوار اصفهان در سال زراعی ۸۴-۱۳۸۳، نشان دادند متوسط بهره‌وری آب برای محصولات چغندر قند، آفتابگردان، ذرت علوفه‌ای و گندم به ترتیب ۰/۹۹، ۰/۲۲، ۱/۷۶ و ۰/۴۹ کیلوگرم بر مترمکعب می‌باشد.

لای و همکاران (۲۰۰۸) مطالعاتی با استفاده از تصاویر NOAA و الگوریتم SBBAL^۱ روی میزان آب مصرفی و بهره‌وری آب گیاه گندم در دشت‌های شمال چین (شامل ۸۳ استان) انجام داد. طبق نتایج به دست آمده خطای نسبی بین مقدار تبخیر و تعرق فصلی با داده‌های لایسیمتری وزنی ۴/۲ درصد می‌باشد. همچنین حداکثر و حداقل مقدار بهره‌وری به ترتیب ۱/۶۷ و ۰/۵ کیلوگرم بر هر مترمکعب آب مصرفی به دست آمد.

بخش کشاورزی بزرگترین مصرف کننده آب شناخته شده است. با ادامه افزایش جمعیت، توسعه شهرنشینی و گسترش صنایع تا سال ۲۰۲۵ میزان آب قابل تخصیص به بخش کشاورزی در سراسر دنیا محدودتر خواهد شد. بنابراین اگر میزان سرمایه‌گذاری در مدیریت پایدار منابع آب طی سالیان آینده کاهش یابد، جهان با کاهش چشمگیری در تولید غذا و افزایش قیمت مواد غذایی و بحران‌های فراوانی در بخش محیط‌زیست مواجه خواهد شد. مؤسسه بین‌المللی مدیریت آب (IWMI) در سال ۲۰۰۱ برای تولید محصولات مختلف و تأمین مواد غذایی دو نظریه متفاوت جهانی را مورد تجزیه و تحلیل قرار داد. بر اساس نظریه اول آب اختصاص یافته به بخش کشاورزی برای تأمین مواد غذایی ضعیف رو به رشد کره زمین کافی نمی‌باشد و امکان برداشت آب بیشتر از منابع سطح و زیرزمینی حداکثر با ۱۲-۱۱ درصد رشد عملی است. نظریه دوم که بیشتر مورد توجه می‌باشد، تأکید بر بهره‌برداری بهینه از منابع آب دارد. طبق این نظریه ضروری است که کارآیی مصرف آب در بخش کشاورزی (WP) افزایش یابد. میزان محصول تولید شده به کیلوگرم به ازاء هر مترمکعب آب آبیاری مصرف شده کارائی مصرف آب نامیده می‌شود. با افزایش بهره‌وری آب می‌توان احتیاجات غذایی جمعیت رو به رشد کره زمین را تأمین کرد. لازم بذکر است بر اساس برنامه چالش جهانی آب و غذا^۲، بایستی علاوه بر افزایش تولید به ازاء مقدار آب مصرفی، موجبات بالا بردن وضعیت معیشتی اجتماع و بهبود شرایط زیست محیطی را نیز فراهم کرد. بهره‌وری آب به صورت‌های مختلفی ارائه شده است که عبارتند از: بهره‌وری بر پایه تعرق (WP_T)، بهره‌وری بر پایه تبخیر و تعرق (WP_{ET})، بهره‌وری بر پایه

1- International Water Management Institute
2- Water Productivity
3- Challenge Program on Water and Food

4- Surface Energy Balance Algorithms for Land

زیر کشت کشور را به خود اختصاص می‌دهد که سهم گندم آبی از این سطح ۳۵ درصد است (اسفندیارپور، ۱۳۹۳). از طرفی بخش عمده تولید گندم کشور از اراضی فاریاب تأمین می‌گردد؛ بنابراین تدوین و تبیین الگوی بهینه مصرف آب به عنوان مهمترین نهاده کشاورزی از جمله شاخص‌های موثر در رسیدن به بهره‌برداری پایدار از منابع آب و خاک به حساب می‌آید. بدین منظور بررسی وضعیت بهره‌وری آب گیاه در گستره‌های کشاورزی و شرایط اقلیمی متفاوت ضروری می‌باشد. هدف از این تحقیق بررسی توزیع زمانی و مکانی بهره‌وری آب گیاه گندم در سطح دشت قزوین با استفاده از تصاویر ماهواره-ای و مقایسه آن با استانداردهای بین‌المللی می‌باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه دشت قزوین واقع در استان قزوین می‌باشد که در عرض جغرافیایی $49^{\circ}18'$ تا $50^{\circ}41'$ شرقی و $35^{\circ}57'$ تا $36^{\circ}22'$ شمالی قرار گرفته است. اقلیم منطقه بر اساس اقلیم نمای دومارتن نیمه خشک می‌باشد. متوسط بارندگی سالانه منطقه ۳۴۲ میلی-متر و متوسط تبخیر سالانه ۱۳۵۸ میلی‌متر می‌باشد. گیاهان عمده در شبکه آبیاری دشت قزوین گندم، جو، انگور و سورگوم می‌باشد (شکل ۱).

اطلاعات لایسیمتر

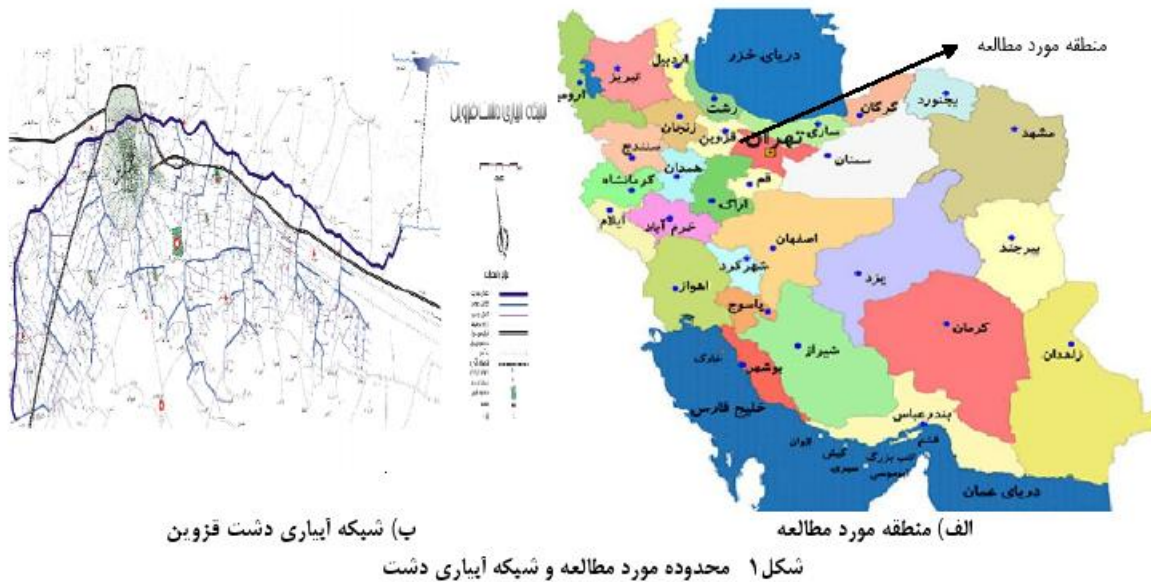
لایسیمتر مورد استفاده از نوع زهکش‌دار بوده که در مختصات $49^{\circ}54'35''$ شرقی و $36^{\circ}15'24''$ شمالی قرار دارد. ابعاد لایسیمتر $1/2 \times 2/4$ مترمربع و ارتفاع آن ۱/۵ متر می‌باشد. زمان کشت گندم در لایسیمتر دهم مهر ماه ۱۳۹۱ و زمان برداشت آن پانزدهم مرداد ماه بود. بذر انتخابی برای کشت در لایسیمتر رقم پیش‌تاز بود که مقدار آن بر اساس توصیه‌های تحقیقاتی ۴۰۰ بذر در واحد سطح در نظر گرفته شد.

وزارت و باستانسن (۲۰۰۴) مطالعات متعددی با هدف بررسی کارایی مصرف و بهره‌وری آب گیاهان زراعی در نقاط مختلف جهان انجام دادند. نتایج این بررسی‌ها نشان داد در کشور چین بهره‌وری مصرف آب گندم (WP_{ET}) طی سال‌های ۱۹۹۶ تا ۲۰۰۳ بین ۰/۸۴ تا ۱/۶۳ کیلوگرم بر مترمکعب می‌باشد. این رقم در هند بین ۰/۶۴ تا ۱/۱۹ و در ترکیه ۱/۳۳ تا ۱/۴۵ کیلوگرم بر مترمکعب گزارش شد. همچنین، بهره‌وری مصرف آب برنج (WP_{ET}) در چین ۱/۴۱ تا ۱/۸۴ و در هند ۰/۴۶ تا ۱/۱۵ کیلوگرم بر مترمکعب به دست آمد.

حیدری و همکاران (۱۳۸۴) مقدار بهره‌وری آب بر پایه آب مصرفی در پنج منطقه مهم کشاورزی کشور (کرمان، همدان، مغان، گلستان و خوزستان) را برای گیاهان زراعی، گندم، چغندر قند (شکر تولیدی)، سیب زمینی، ذرت علوفه‌ای، پنبه، یونجه (وزن خشک)، جو، نیشکر (شکر تولیدی) به ترتیب ۰/۷۵، ۰/۶۴، ۰/۲۰۶، ۰/۵۸، ۰/۷۱، ۱/۴۶، ۰/۵۶، ۰/۲۹ کیلوگرم محصول بر مترمکعب آب مصرفی گزارش کردند. این محققین همچنین توصیه کردند که افزایش آگاهی و مهارت کشاورزان از طریق برنامه‌های مختلف آموزشی و ترویجی (با روش‌های جدید و با در نظر گرفتن پیشرفت‌های اخیر در کشاورزی جهان) از اقدامات مهمی است که باید در برنامه‌های ارتقاء افزایش بهره‌وری آب در نظر گرفته شوند.

آلن و همکاران (۲۰۰۳) در تحقیقی در ایالات

متحده در دره رودخانه بیر با استفاده از الگوریتم سبال به مقایسه نتایج با داده‌های لایسیمتری پرداختند. نتایج نشان داد که مقادیر تبخیر و تعرق ماهانه ۱۶ درصد و مقادیر فصلی ۴/۳ درصد با داده‌های لایسیمتر تفاوت دارد. همچنین، این محققین به وسیله این مقادیر ضریب گیاهی (K_c) را در طول فصل رشد توسط تبخیر و تعرق گیاه مرجع (ET_0) محاسبه شده توسط داده‌های زمینی محاسبه نمودند. گندم به عنوان مهمترین محصول زراعی ایران به طور متوسط مساحتی معادل ۶/۵ میلیون هکتار از اراضی



تبخیر و تعرق گندم در دوره‌های هفت روزه با توجه به مقادیر آبیاری، آب زهکشی شده و تغییرات رطوبتی خاک محاسبه (رابطه ۱) و در انتهای دوره عملکرد دانه، وزن هزار دانه، تعداد دانه در سنبله، عملکرد بیولوژیکی، تعداد بوته در هر متر مربع و ارتفاع بوته اندازه‌گیری شد.

$$ETc = I + P - D \pm \Delta S \quad (1)$$

که در آن:

I عمق آب آبیاری، P بارندگی، D آب زهکشی، ΔS تغییرات رطوبتی در گام زمانی و ETc تبخیر و تعرق گیاه کشت شده در لایسیمتر است. همچنین کلیه اعداد بر حسب میلی‌متر می‌باشد.

تصاویر ماهواره‌ای

داده‌های سنجش از دور که توسط ماهواره برداشت می‌شود این مزیت را دارند که از آنها می‌توان اطلاعات همزمانی را در یک منطقه وسیع برداشت کرد جهت انجام این تحقیق از تصاویر ماهواره لندست ۵ در سال ۱۳۹۲ استفاده گردید. علت انتخاب این ماهواره قدرت تفکیک مکانی متوسط این تصاویر و در دسترس بودن آنها می‌باشد. در این تحقیق از ۱۸ تصویری که در طول فصل رشد گیاه در منطقه اخذ شده بود تنها پنج تصویر (تاریخ‌های ۹۲/۰۲/۳۰، ۹۲/۰۳/۰۷،

کود نیتروژن از منبع اوره (۴۶ درصد) به میزان صد کیلوگرم در هکتار بر اساس آزمون خاک محاسبه گردید که از این میزان یک سوم به صورت پایه و مابقی در دو نوبت (اواسط پنجه زنی و پس از مصرف علف کش و اواسط دوره رشد ساقه) به صورت سرک به لایسیمتر داده شد. فسفر و پتاسیم مورد نیاز به ترتیب از منبع سوپر فسفات تریپل و سولفات پتاسیم بر مبنای صد کیلوگرم در هکتار K_2O و P_2O_5 به صورت پایه مصرف گردید. برای کنترل علف‌های هرز باریک برگ و پهن برگ به ترتیب از علف‌کش تاپیک به میزان یک لیتر در هکتار و گرانستار به میزان ۲۰ گرم در هکتار در اواسط پنجه زنی استفاده شد. بافت خاک داخلی درون و اطراف لایسیمتر مانند جنس غالب خاک منطقه لوم رسی (CL) بود و مکش رطوبت خاک همواره توسط تانسیومترهای نصب شده در عمق‌های ۳۰ و ۶۰ سانتی‌متری کنترل می‌شد. هر وقت قرائت تانسیومتر نصب شده در عمق ۳۰ سانتی‌متری از ۴۰ سانتی‌بار بیشتر می‌شد، آبیاری صورت می‌گرفت. اندازه‌گیری‌های لایسیمتر از ۲۰ مهر ماه ۹۱ (۱۲ اکتبر ۲۰۱۲) آغاز و تا تاریخ ۲۰ تیر ماه ۹۲ (۱۰ جون ۲۰۱۳) به فواصل هفت روز ادامه داشت. در همین مدت مقدار آب زهکشی شده از لایسیمتر و میزان رطوبت در ابتدا و انتهای هر دوره در اعماق مختلف اندازه‌گیری می‌شد. نهایتاً مقدار

$$R_n = (1 - \alpha)R_{S\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1 - \varepsilon_0)R_{L\uparrow} \quad (3)$$

که در آن:

α آلبیدوی سطح (بدون بعد) و ε_0 گسیلندگی سطح به دست آمده از طریق شاخص سطح برگ (LAI) می‌باشد. در الگوریتم سبال دو نوع گسیلندگی از سطح استفاده می‌شود که عبارتند از: ε_{NB} که برای محاسبه دمای سطح و ε_0 که برای محاسبه تشعشعات طول موج بلند گسیل یافته از سطح استفاده می‌شود. مقادیر ε_{NB} و ε_0 برای شرایطی که شاخص تعدیل شده اختلاف پوشش گیاهی^۲ (NDVI) بزرگتر از صفر باشد از روابط ۴ و ۵ به دست می‌آید (آلن و همکاران ۲۰۰۵):

$$\varepsilon_{NB} = 0.97 + 0.0033 \text{ LAI} \quad \text{LAI} < 3 \quad (4)$$

$$\varepsilon_0 = 0.95 + 0.01 \text{ LAI} \quad \text{LAI} < 3 \quad (5)$$

که در آن:

ε_0 قابلیت انتشار حرارتی سطح (بدون بعد)، ε_{NB} قابلیت انتشار تشعشعات طول موج بلند گسیل یافته از سطح (بدون بعد) و LAI شاخص سطح برگ (بدون بعد) می‌باشد. اگر $\text{LAI} \geq 3$ باشد، ε_{NB} و ε_0 برابر با ۰/۹۸ می‌باشد.

شاخص سطح برگ^۳ (LAI) با استفاده از رابطه ۶ محاسبه می‌گردد

$$\text{LAI} = -\frac{\ln\left(\frac{a - \text{SAVI}}{b}\right)}{c} \quad (6)$$

که در آن:

SAVI شاخص تصحیح شده NDVI، a ، b و c ضرایب ثابت می‌باشند که در هر منطقه باید کالیبره شود. به عنوان نمونه در آیداهوی جنوبی مقادیر a ، b و c به ترتیب برابر با ۰/۶۹، ۰/۵۹ و ۰/۹۱ می‌باشد. مقادیر بدست آمده حاصل از واسنجی در این تحقیق برای منطقه مورد مطالعه به ترتیب ۰/۷۳، ۰/۶۸ و ۰/۹۰ به دست آمد. حداکثر مقدار LAI برابر با ۶/۰ و حداکثر مقدار SAVI برابر با ۰/۶۸۷ می‌باشد.

زیرا تصاویر مورد استفاده باید دارای شرایط مناسب هواشناسی و بدون ابر باشند. در این مطالعه از نرم افزارهای ENVI 4.2 و ERDAS Imagine 9.1 جهت انجام پردازش‌های تصویری و اجرای الگوریتم سبال و نرم‌افزار ArcGIS9.3 جهت ترسیم نقشه‌های تبخیر و تعرق و بهره‌وری آب گندم در دشت قزوین در محیط GIS استفاده گردیده است. کلید اطلاعات مکانی به کمک آمار دریافتی و همچنین بازبدهای میدانی زمین مرجع^۱ شد. از لازم به ذکر است که مراحل مختلف الگوریتم سبال با استفاده از امکانات Model Maker در نرم افزار ERDAS Imagine 9.1 برنامه‌نویسی شده و الگوریتم سبال برای هر تصویر بعد از انجام اصلاحات مورد نیاز اجرا گردید.

الگوریتم سبال

در این الگوریتم با استفاده از معادله توازن انرژی مقدار شار گرمای نهان تبخیر برای هر پیکسل از رابطه (۲) به دست می‌آید (باستیانسن و همکاران ۲۰۰۲):

$$\lambda ET = R_n - G - H \quad (2)$$

که در آن:

λET شار گرمای نهان تبخیر (W/m^2)، R_n میزان تابش خالص خورشیدی (W/m^2)، G شار گرمای خاک (W/m^2) و H شار گرمای محسوس (W/m^2) می‌باشد.

مقدار تابش خالص از توازن چهار شار تابشی در سطح زمین به دست می‌آید که عبارتند از تابش طول موج کوتاه ورودی ($R_{S\downarrow}$)، بازتابش طول موج کوتاه خروجی ($R_{S\uparrow}$)، تشعشعات طول موج بلند ورودی به اتمسفر ($R_{L\downarrow}$) و تشعشعات طول موج بلند گسیل شده از سطح ($R_{L\uparrow}$). تابش خالص با استفاده از رابطه ۲ محاسبه می‌شود (باستیانسن و همکاران ۱۹۹۸):

2- Normalized Difference Vegetation Index
3- Leaf Area Index

1- GeoReference

(۲۰۰۶). $WDVI$ شاخص وزنی (مادون قرمز نزدیک) اختلاف پوشش گیاهی^۱ و α برابر با شیب خاک بوده که مقدار آن برابر با $1/6$ می‌باشد.

در این مطالعه برای محاسبه آلیدوی سطح از روشی که تصحیحات اتمسفری را برای هر باند از سنجنده اعمال می‌کند استفاده شده است (آلن و همکاران، ۲۰۰۵). آلیدوی سطح با استفاده از روابط ۱۱ و ۱۲ به دست می‌آید.

$$\alpha = (\alpha_{toa} - \alpha_{(path-radiance)}) / \tau_{sw} \quad (11)$$

$$\tau_{sw} = 0.75 + (2 \times 10^{-5} \times Z) \quad (12)$$

که در آن:

α_{toa} مقدار آلیدو در بالای اتمسفر، τ_{sw} ضریب انتقال اتمسفر، Z ارتفاع از سطح دریا (m) و $\alpha_{path-radiance}$ میانگین نسبت تشعشع ورودی خورشید در تمام باندها که به سمت ماهواره بر می‌گردد قبل از اینکه به سطح زمین برسد که در الگوریتم سبال مقدار آن 0.03 در نظر گرفته می‌شود (باستیانسن، ۲۰۰۰).

مقدار آلیدو در بالای اتمسفر با استفاده از روابط ۱۳ تا ۱۵ به دست می‌آید (باستیانسن و همکاران، ۲۰۰۲):

$$\alpha_{toa} = \sum_{i=1}^n (w_{\lambda i} \times \rho_{\lambda i}) \quad (13)$$

$$w_{\lambda} = \frac{ESUN_{\lambda}}{\sum_{i=1}^n ESUN_{\lambda}} \quad (14)$$

$$\rho_{\lambda} = \frac{\pi L_{\lambda}}{ESUN_{\lambda} \times \cos \theta \times d_r} \quad (15)$$

که در آنها:

L_{λ} تابش طیفی ($W/m^2/sr/\mu m$), θ زاویه میل خورشیدی، d_r معکوس فاصله نسبی زمین تا خورشید، w_{λ} ضریب وزنی برای هر باند، $ESUN_{\lambda}$ پتانسیل تابش خورشید در هر باند ($W/m^2/\mu m$) و ρ_{λ} میزان انعکاس در هر باند سنجنده در سطح (بدون بعد) می‌باشد.

شاخص گیاهی NDVI، وضعیت پوشش گیاهی در سطح زمین را مشخص می‌کند. NDVI با استفاده از رابطه ۷ برای تصاویر لندست محاسبه می‌گردد (باستیانسن و همکاران، ۲۰۰۲):

$$NDVI = \frac{\rho_4 - \rho_3}{\rho_4 + \rho_3} \quad (7)$$

که در آن:

ρ_4 و ρ_3 بازتاب طیفی باندهای ۳ و ۴ می‌باشد.

شاخص گیاهی NDVI بین -۱ تا +۱ متغیر می‌باشد. زمین‌های شامل پوشش گیاهی متراکم دارای مقادیر مثبت 0.7 تا 0.8 هستند. برخلاف ابر، آب و برف طول موج بخش مرئی را بیشتر از طول موج مادون قرمز نزدیک انعکاس می‌دهند (باستیانسن، ۲۰۰۰). بنابراین، این پدیده‌ها دارای شاخص‌های منفی هستند. صخره‌ها و مناطق خاکی بدون پوشش، در هر دو باند انعکاس مشابهی داشته و در نتیجه شاخص پوشش گیاهی آنها صفر خواهد بود.

در مناطق خشک و نیمه خشک تنک بودن پوشش گیاهی باعث می‌شود اثرات بازتاب خاک زمینه، اثر بازتاب پوشش گیاهی را تحت تاثیر قرار دهد و بر آن غلبه کند. SAVI شاخص تصحیح شده NDVI است که اثرات زمینه و رطوبت خاک را در شاخص NDVI کاهش می‌دهد و از رابطه ۸ به دست می‌آید (باستیانسن و همکاران، ۲۰۰۲):

$$SAVI = \frac{(1+L)(\rho_4 - \rho_3)}{\rho_4 + \rho_3 + L} \quad (8)$$

که در آن:

L فاکتور تصحیح اثرات خاک می‌باشد که دامنه آن صفر برای پوشش گیاهی متراکم تا ۱ برای پوشش گیاهی با تراکم کمتر متغیر است. مقدار L با استفاده از اطلاعات تصاویر و روابط ۹ و ۱۰ به دست می‌آید.

$$L = 1 - (2 \times \alpha \times NDVI \times WDVI) \quad (9)$$

$$WDVI = \rho_4 - \gamma \rho_3 \quad (10)$$

که در آن:

γ ضریب خط خاک می‌باشد که در واقع شیب خط برازش داده شده بر نمودار طیفی باندهای مادون قرمز نزدیک (باند ۴) و قرمز (باند ۳) است (یانگ و همکاران،

1- Weighted (near infrared red) Difference Vegetation Index

و Z_2 و r_{ah} مقاومت آئرو دینامیکی برای انتقال گرما (sec/m) می‌باشد.

چگالی هوا با توجه به نقشه ارتفاعی و دمای سطحی برای هر پیکسل محاسبه می‌گردد. این محاسبات تابعی از گرادیان دما، زبری سطح و سرعت باد می‌باشند. با این وجود حل رابطه ۱۸ به دلیل دو عامل ناشناخته r_{ah} و dT مشکل است. در الگوریتم سبال جهت برآورد شار گرمای محسوس، ابتدا دو پیکسل آستانه انتخاب می‌شود یکی از پیکسل‌ها که پیکسل سرد نامیده می‌شود مربوط به منطقه - ای است که به طور کامل پوشیده از پوشش گیاهان آبیاری شده است و دمای سطح زمین در این پیکسل نزدیک دمای هوا می‌باشد. پیکسل دوم که پیکسل گرم نامیده می‌شود زمین کشاورزی بدون پوشش گیاهی و خشک می‌باشد که تبخیر و تعرق در آن صفر فرض می‌شود. در این تحقیق از NDVI و دمای سطحی تصحیح شده برای تعیین پیکسل سرد و گرم استفاده شد، به طوری که در پیکسل گرم NDVI حداقل و دمای سطحی حداکثر بوده و در پیکسل سرد، NDVI حداکثر و دما حداقل می‌باشد. در سبال برای به دست آوردن اختلاف دمای هوای نزدیک سطح (dT) در هر پیکسل، ابتدا باید این پارامتر را برای پیکسل سرد و گرم به دست آورده و سپس با ایجاد رابطه خطی بین این دو پیکسل، می‌توان dT را برای سایر پیکسل‌ها به دست آورد. پس از آن مقدار شار گرمای محسوس بر اساس شرایط جوی و فرایند رفت و برگشتی تصحیح می‌گردد (باستیانسن و همکاران، ۱۹۹۸).

سپس تبخیر و تعرق بر اساس رابطه بیلان انرژی در لحظه گذر ماهواره محاسبه می‌شود. این مقدار بایستی به تبخیر و تعرق روزانه تبدیل گردد. برای این منظور جزء تبخیری (ET_{rF}) برای هر پیکسل تصویر از رابطه ۱۹ محاسبه می‌شود (باستیانسن و همکاران، ۲۰۰۲):

$$ET_{rF} = \frac{ET_{inst}}{ET_r} \quad (19)$$

$$ET_{inst} = 3600 \frac{\lambda ET}{\lambda} \quad (20)$$

که در آن‌ها:

اندازه گیری شار گرمای خاک (G) به طور مستقیم با استفاده از سنجش از دور امکان‌پذیر نیست اما مطالعات بسیاری نشان دادند که بین مقدار $\frac{G}{R_n}$ و پارامترهایی چون $NDVI$ ، دمای سطح (T_s) و آلبیدو و رابطه‌ای وجود دارد. تخمین $\frac{G}{R_n}$ برای دریاچه‌های عمیق و زلال پیچیده است. برای اوایل تابستان که دریاچه خنکتر از هوا می‌باشد این مقدار بیشتر و در پاییز که دریاچه گرمتر است این مقدار کمتر می‌باشد. $\frac{G}{R_n}$ برای منابع کم عمق و کدر کمتر از ۰/۵ می‌باشد زیرا در نزدیکی سطح آب جذب طول موج کوتاه بیشتر می‌باشد (باستیانسن، ۲۰۰۰).

در این تحقیق از رابطه زیر جهت برآورد مقدار شار گرمای خاک استفاده شده است (باستیانسن، ۲۰۰۰)

$$\begin{aligned} \frac{G}{R_n} &= [(T_s \\ &- 273.16) / \alpha (0.0038 \alpha \\ &+ 0.0074 \alpha^2) (1 \\ &- 0.98 NDVI^4)] \end{aligned} \quad (16)$$

دمای سطحی با استفاده از باند حرارتی محاسبه شد (باستیانسن و همکاران، ۲۰۰۲):

$$T_s = \frac{K_2}{\ln \left(\frac{\epsilon_{NB} \times K_1}{R_c} + 1 \right)} \quad (17)$$

که در آن:

R_c تشعشعات حرارتی اصلاح شده با استفاده از تابش طیفی باند ۶ $(W/m^2/sr/\mu m)$ ، ϵ_{NB} گسیلندگی سطح جهت محاسبه دمای سطح (رابطه ۴) و K_1 و K_2 ضرایب ثابت برای تصاویر لندست ۵ $(W/m^2/sr/\mu m)$ می‌باشد که مقدار آنها به ترتیب ۶۰۷/۷۶ و ۱۲۶۰/۵۶ می‌باشد (مارحام و بارکر، ۱۹۸۶).

مهم‌ترین و مشکل‌ترین قسمت در الگوریتم سبال محاسبه شار گرمای محسوس (H) بر اساس انتقال گرما است که مقدار آن از رابطه ۱۸ به دست می‌آید:

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

که در آن:

ρ چگالی هوا (kg/m^3) ، C_p گرمای ویژه هوا $(1004 J/kg/^\circ K)$ ، dT اختلاف دما $(^\circ K)$ بین دو ارتفاع Z_1

ET_{inst} تبخیر و تعرق لحظه‌ای (mm/hr)، λ گرمای

نهان تبخیر (J/kg)، λET مقدار لحظه‌ای شار گرمای

نهان تبخیر در لحظه عبور ماهواره (W/m^2)، ET_r تبخیر

و تعرق گیاه مرجع (mm/hr) و ۳۶۰۰ برای تبدیل ثانیه به ساعت می‌باشد.

با فرض اینکه جزء تبخیر لحظه‌ای محاسبه شده

برابر با میانگین روزانه باشد، می‌توان با استفاده از رابطه

۲۱ تبخیر و تعرق روزانه را محاسبه نمود (باستیانسن و

همکاران، ۲۰۰۲):

$$ET_{24} = ET_{rF} \times ET_{r-24} \quad (21)$$

که در آن:

ET_{24} تبخیر و تعرق روزانه (mm/day) می‌باشد.

ماده خشک تولیدی

با مشاهدات مزرعه‌ای و استفاده از تصاویر

ماهواره نقشه الگوی کشت گندم استخراج گردید (شکل

۲). بر اساس شادابی گیاه و تاثیر مستقیم آن بر مقدار

NDVI مقدار ماده خشک قابل مشاهده بر روی سطح

زمین از رابطه ۲۲ به دست می‌آید (باستیانسن و سامیا،

۲۰۰۳).

$Biomass_{Dry}$

$$= 0.48 \times R_{s\downarrow} \times \tau_{sw} \times (-0.161 + 1.257 \times NDVI) \times \varepsilon_{max} \times \frac{S_a + 0.67 + \left(1 + \frac{r_{s,min}}{r_{av}}\right)}{S_a + 0.67 + \left(1 + \frac{r_s}{r_{av}}\right)} \times \varphi_h \quad (22)$$

که در آن:

$R_{s\downarrow}$ تابش طول موج کوتاه ورودی از اتمسفر، τ_{sw}

گسیلنده اتمسفر، φ_h پاسخ روزنه‌ها به دما، S_a شیب

منحنی فشار بخار، r_s مقاومت ظاهری سطح، r_{av} مقاومت

آرئودینامیکی در برابر انتقال بخار و ε_{max} حداکثر

راندمان مصرف نور می‌باشد.

در این رابطه مقدار تابش طول موج کوتاه

ورودی از اتمسفر در منطقه مورد مطالعه بین صفر تا ۷۲۲

مگا ژول بر متر مربع بر روز متغیر بود. حداکثر سرعت

جذب نور ۴۰ کیلوگرم در هکتار در ساعت در نظر گرفته

شد. مقدار NDVI در منطقه مورد مطالعه بین ۰/۲۸ تا

۰/۴۴ می‌باشد. مقدار r_{av} بین ۵۱ تا ۱۰۴ ثانیه بر متر در

محدوده مورد مطالعه بود. مقدار آلیبدو در محدوده دشت

بین ۰/۸۷ تا ۰/۹۹۹ متغیر بود. مقدار دمای سطح برگ در

محدوده مورد مطالعه بین ۱۱ تا ۳۹ درجه سانتی گراد

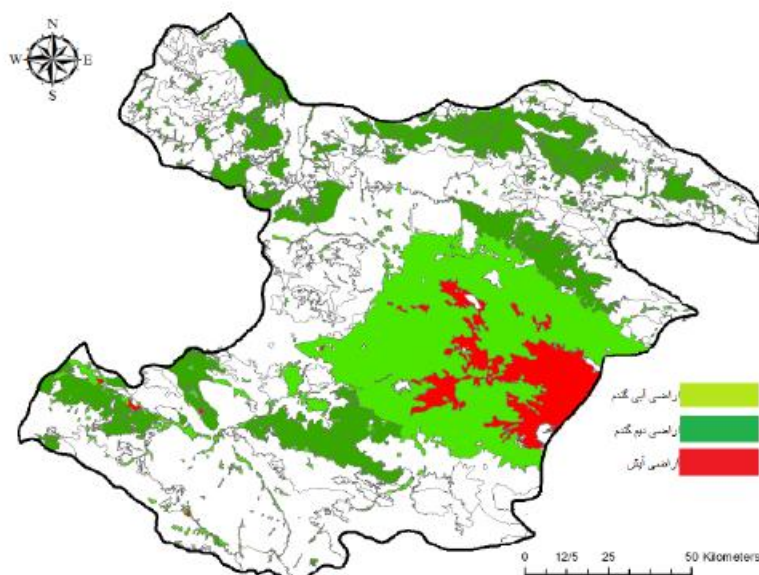
است. مقدار r_s از تقسیم کردن مقاومت روزنه ای برگ

(ثانیه بر متر) بر شاخص سطح برگ به دست می‌آید که

مقدار آن در محدوده مورد مطالعه بین ۴۰ تا ۹۳ بود و

شیب منحنی فشار بخار بین ۰/۱۱ تا ۰/۱۴۵ کیلوپاسکال

بر درجه سانتی گراد در منطقه مورد مطالعه بود.



شکل ۲ الگوی کشت گندم در دشت قزوین

محاسبه شده با لایسیمتر در ماه مورد نظر (i) (میلی متر بر روز) و n تعداد داده‌های تبخیر و تعرق می‌باشد.

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n ET_{LYSIMETER,i} ET_{SEBAL,i} - n \overline{ET}_{LYSIMETER} \overline{ET}_{SEBAL}}{\sqrt{(\sum_{i=1}^n ET_{LYSIMETER,i}^2 - n \times \overline{ET}_{LYSIMETER}^2)(\sum_{i=1}^n ET_{SEBAL,i}^2 - n \times \overline{ET}_{SEBAL}^2)}} \quad (26)$$

که در آن:

ET_{SEBAL} تبخیر و تعرق محاسبه شده با الگوریتم سبال (میلی متر بر روز)، $ET_{LYSIMETER}$ تبخیر و تعرق محاسبه شده با لایسیمتر (میلی متر بر روز)، $ET_{SEBAL,i}$ تبخیر و تعرق محاسبه شده با الگوریتم سبال در ماه مورد نظر (i) (میلی متر بر روز)، $ET_{LYSIMETER,i}$ تبخیر و تعرق محاسبه شده با لایسیمتر در ماه مورد نظر (i) (میلی متر بر روز)، \overline{ET}_{SEBAL} میانگین داده‌های تبخیر و تعرق محاسبه شده با الگوریتم سبال (میلی متر بر روز)، $\overline{ET}_{LYSIMETER}$ میانگین داده‌های تبخیر و تعرق محاسبه شده با لایسیمتر (میلی متر بر روز) و n تعداد داده‌های تبخیر و تعرق می‌باشد.

بنابراین بطور خلاصه می‌توان تفکیک گیاهان مختلف در تصاویر RS و برآورد میزان ET و بیوماس به اینصورت می‌باشد که پس از تهیه داده ماهواره‌ای، ابتدا

مقایسه تبخیر و تعرق سبال با مقادیر لایسیمتر به منظور یافتن دقت الگوریتم سبال نتایج به دست آمده با داده‌های لایسیمتر مورد مقایسه قرار گرفت. برای این منظور از پارامترهای تفاضل مطلق^۱ (AD)، تفاضل نسبی^۲ (RD)، میانگین تفاضل مطلق^۳ (MAD) (روابط ۲۳ تا ۲۵) و ضریب تعیین^۴ (R) (رابطه ۲۶) استفاده شد:

$$AD = |ET_{SEBAL} - ET_{LYSIMETER}| \quad (23)$$

$$RD = \frac{|ET_{SEBAL} - ET_{LYSIMETER}|}{ET_{LYSIMETER}} \quad (24)$$

$$MAD = \frac{\sum_{i=1}^n |ET_{SEBAL,i} - ET_{LYSIMETER,i}|}{n} \quad (25)$$

که در آنها:

ET_{SEBAL} تبخیر و تعرق محاسبه شده با الگوریتم سبال (میلی متر بر روز)، $ET_{LYSIMETER}$ تبخیر و تعرق محاسبه شده با لایسیمتر (میلی متر بر روز)، $ET_{SEBAL,i}$ تبخیر و تعرق محاسبه شده با الگوریتم سبال در ماه مورد نظر (i) (میلی متر بر روز)، $ET_{LYSIMETER,i}$ تبخیر و تعرق

1- Absolute Difference
2- Relative Difference
3- Mean Absolute Difference
4- Determination coefficient

می‌کند. این موضوع به این معنی است که در L های کوچک اثرات خاک خود را بیشتر در منطقه نشان می‌دهد و به این دلیل انحراف معیار در SAVI حاصل از مقادیر $L = 1$ به حداقل رسیده که با توجه به اقلیم نیمه خشک منطقه مقادیر بهینه L در حد یک برآورد می‌گردد (باستیانسن و همکاران، ۲۰۰۲). از سوی دیگر با زیاد شدن L مقدار SAVI کاهش یافت. به نحوی که در L های بزرگ و در خاکهای تیره یا پوشش‌های گیاهی بسیار اندک، LAI مفهوم فیزیکی خود را از دست داده و منفی می‌گردد که در محاسبات صفر منظور گردید. در واقع با این روش می‌توان نقاطی را که دارای پوشش گیاهی هستند را مشخص نمود. جدول ۱ آماره‌های مربوط به شاخص SAVI را در سطح منطقه نشان می‌دهد. مقدار میانگین SAVI در $92/04/01$ برابر با $0/175$ می‌باشد که نسبت به تاریخ‌های دیگر بیشتر بود. دلیل آن وجود همزمان محصولات پاییزه، بهاره و مراتع می‌باشد و در تاریخ $92/04/20$ به دلیل اینکه محصولات پاییزه برداشت می‌شود میانگین SAVI دشت کاهش می‌یابد. در تاریخ $92/05/06$ به دلیل به حداکثر رسیدن تراکم کشت محصولات بهاره میانگین شاخص SAVI افزایش می‌یابد. در تاریخ $92/02/30$ و $92/03/07$ میانگین SAVI در دشت افزایش یافت که نشان دهنده رشد گیاهان بهاره و پاییزه می‌باشد.

جدول ۱ آمار SAVI در محدوده مورد مطالعه

تاریخ	حداقل	حداکثر	میانگین	میانه	مد
۹۲/۰۲/۳۰	-۰/۰۰۸	۰/۶۱	۰/۱۶۱	۰/۱۴۰	۰/۱۲۸
۹۲/۰۳/۰۷	-۰/۰۱۱	۰/۶۵	۰/۱۶۷	۰/۱۴۶	۰/۱۳۵
۹۲/۰۴/۰۱	-۰/۰۱۶	۰/۶۸	۰/۱۷۵	۰/۱۵۰	۰/۱۳۷
۹۲/۰۴/۲۰	-۰/۰۵۵	۰/۶۹	۰/۱۶۱	۰/۱۴۰	۰/۱۳۰
۹۲/۰۵/۰۶	-۰/۰۴۳	۰/۶۸	۰/۱۷۱	۰/۱۵۰	۰/۱۳۸

هر پنج تصویر دیده می‌شود. میانگین، میانه و مد آلبیدوی سطحی در هر پنج تصویر در محدوده $0/281$ تا $0/368$ قرار دارد که در دامنه قابل قبول برای مزارع کشاورزی و مراتع می‌باشد (هوریگوچی، ۱۹۹۲).

تصحیح هندسی با میانگین خطای مربعات $0/75$ بر روی تصویر اعمال گردید. در مرحله بعد با توجه به کوهستانی بودن منطقه تصحیح توپوگرافی بر روی تصویر انجام شد. در نهایت نقشه کاربری و پوشش اراضی با استفاده از روش طبقه بندی ترکیبی تهیه گردید. در این مطالعه نقشه درصد تاج پوشش گیاهی با استفاده از شاخص گیاهی SAVI و نمونه برداری‌های میدانی بدست آمد. نقشه هر کاربری و پوشش منطقه با اعمال پردازش‌های گوناگون بر روی تصویر تهیه گردید. در انتها با استفاده از روش‌های GIS تمامی لایه‌های اطلاعاتی با یکدیگر ترکیب و نقشه کاربری و پوشش اراضی منطقه تهیه شد. دقت نقشه تولیدی محاسبه گردید و ضریب کاپا معادل $0/92$ و صحت کلی 94% بدست آمد که دقت مناسب نقشه تولیدی را نشان می‌داد.

نتایج و بحث

در این تحقیق، از شاخص SAVI برای کم کردن اثرات خاک در NDVI استفاده شد. بدین منظور برای هر پنج تصویر انتخابی مقدار SAVI با استفاده از مقادیر L از 0 تا 1 محاسبه گردید. هر چقدر مقدار انحراف معیار کمتر باشد یعنی مقدار SAVI به مقدار ثابتی می‌رسد که نشان از حداقل شدن اثر خاک دارد. نتایج نشان داد به ازاء L های کوچکتر، انحراف از معیار بزرگتر بوده و در L های بزرگ به سمت مقدار ثابتی میل

جدول ۲ آماره‌های مربوط به آلبیدو سطحی محدوده مورد مطالعه را در تاریخ‌های مورد نظر نشان می‌دهد. مقادیر حداکثر و حداقل آلبیدو به ترتیب مربوط به خاک لخت و کوه‌ها در منطقه مورد مطالعه می‌باشد که در

جدول ۲ آمار آلییدو سطحی در محدوده مورد مطالعه

تاریخ	حداقل	حداکثر	میانگین	میانه	مد
۹۲/۰۲/۳۰	-/۱۲	-/۴۷	-/۲۷۱	-/۲۶۹	-/۲۷۱
۹۲/۰۳/۰۷	-/۱۰	-/۴۸	-/۲۷۳	-/۲۷۱	-/۲۶۸
۹۲/۰۴/۰۱	-/۰۸	-/۵۱	-/۲۸۱	-/۲۸۱	-/۲۸۳
۹۲/۰۴/۲۰	-/۰۵	-/۵۱	-/۲۷۷	-/۲۷۵	-/۲۷۰
۹۲/۰۵/۰۶	-/۰۳	-/۵۳	-/۲۷۷	-/۲۷۷	-/۲۷۹

جدول ۳ آماره‌های مربوط به دمای سطح محدوده مورد مطالعه را در تاریخ‌های مورد نظر نشان می‌دهد. تاریخ ۹۲/۰۲/۳۰ با میانگین دمای سطحی ۲۸۵/۳ دارند که این روند با دمای هوا در منطقه مطابقت داشت.

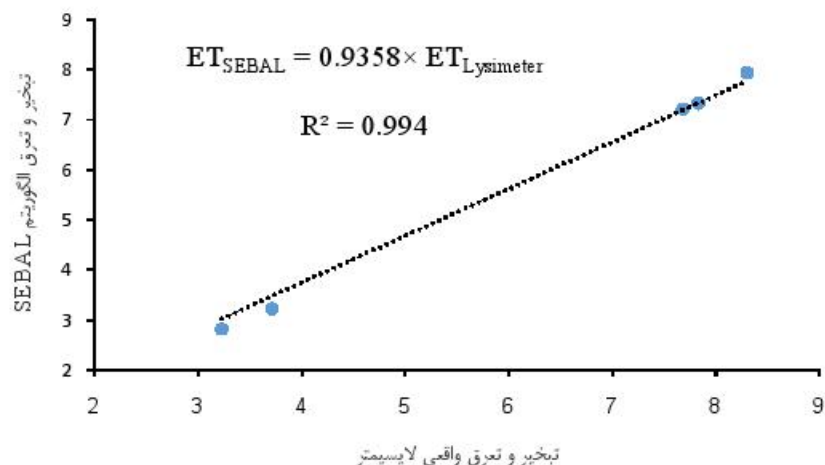
جدول ۳ آمار دمای سطحی محاسبه شده (°K) در محدوده مورد مطالعه

تاریخ	حداقل	حداکثر	میانگین	میانه	مد
۹۲/۰۲/۳۰	۲۸۲/۹	۲۹۸/۲	۲۸۵/۳	۲۸۵/۲	۲۷۵/۷
۹۲/۰۳/۰۷	۲۸۸/۰	۳۰۴/۸	۲۹۳/۷	۲۹۴/۳	۲۹۵/۳
۹۲/۰۴/۰۱	۲۸۹/۷	۳۱۵/۲	۳۰۱/۳	۳۰۰/۳	۳۰۱/۴
۹۲/۰۴/۲۰	۲۸۸/۳	۳۱۸/۷	۳۰۵/۳	۳۰۵/۵	۳۰۴/۳
۹۲/۰۵/۰۶	۲۸۸/۱	۳۱۲/۳	۲۹۹/۴	۳۰۰/۳	۲۹۷/۱

مقادیر تبخیر و تعرق اندازه‌گیری شده گیاه گندم توسط لایسیمتر با مقادیر برآورد شده توسط الگوریتم سبال مورد مقایسه قرار گرفت (جدول ۴). تفاوت بین تبخیر و تعرق محاسبه شده با الگوریتم سبال و اندازه‌گیری شده توسط لایسیمتر کمتر از ۰/۵۱ میلی‌متر بر روز و بیشترین تفاوت مربوط به روز ۹۲/۰۳/۰۷ با ۱۲/۹۳ درصد بود. همچنین، میانگین تفاضل مطلق (MAD) بین نتایج الگوریتم سبال و لایسیمتر ۰/۴۴۶ میلی‌متر بر روز می‌باشد. همچنین مقدار تبخیر و تعرق به دست آمده توسط

جدول ۴ تبخیر و تعرق واقعی روزانه در مزرعه گندم با استفاده از روش لایسیمتر و مقادیر تخمین زده شده بوسیله الگوریتم سبال

تاریخ	لایسیمتر (mm/day)	الگوریتم سبال (mm/day)	تفاضل مطلق (mm/day)	تفاضل نسبی (%)	میانگین تفاضل مطلق (mm/day)
۹۲/۰۲/۳۰	۳/۲۳	۲/۸۲	-/۴۱	۱۲/۷۰	
۹۲/۰۳/۰۷	۳/۷۱	۳/۲۳	-/۴۸	۱۲/۹۳	
۹۲/۰۴/۰۱	۷/۸۳	۷/۳۲	-/۵۱	۶/۵۱	۰/۴۴۶
۹۲/۰۴/۲۰	۷/۶۸	۷/۲۲	-/۴۶	۵/۹۸	
۹۲/۰۵/۰۶	۸/۲۰	۷/۹۳	-/۲۷	۴/۴۵	



شکل ۲- ارتباط مقادیر تبخیر و تعرق واقعی روزانه (میلی‌متر بر روز) حاصل از الگوریتم سیال و لایسیمتر

محصولات بهاره و پاییزه به حداکثر مقدار خود می‌رسد. این تراکم پوشش گیاهی باعث بیشتر شدن تبخیر و تعرق حقیقی در سطح دشت و اختلاف بیشتر با تبخیر و تعرق پتانسیل می‌گردد. با توجه به جدول ۵، میانگین تفاضل مطلق (MAD) بین تبخیر و تعرق الگوریتم سیال و تبخیر و تعرق پتانسیل پنمن-مانتیث-فانو ۰/۵۰۲ میلی‌متر بر روز می‌باشد که با نتایج راموس و همکاران (۲۰۰۹) همخوانی دارد.

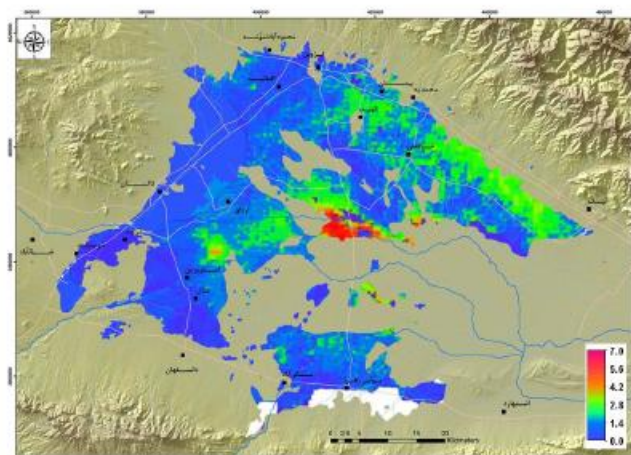
در سطح منطقه وسیله اندازه‌گیری تبخیر و تعرق وجود ندارد. لذا جهت ارزیابی الگوریتم سیال در سطح منطقه، نتایج حداکثر تبخیر و تعرق محاسبه شده با الگوریتم سیال در هر روز با تبخیر و تعرق پتانسیل گیاه مرجع به دست آمده از روش پنمن-مانتیث-فانو مورد مقایسه قرار گرفت (جدول ۵). نتایج نشان داد که بیشترین تفاوت بین این مقادیر مربوط به تاریخ ۹۲/۰۴/۰۱ با ۱۱/۱۰ درصد می‌باشد. دلیل این تفاوت می‌تواند این باشد که در این روز تراکم پوشش گیاهی به دلیل وجود همزمان

جدول ۵ تبخیر و تعرق پتانسیل یا استفاده از روش پنمن مانتیث فانو و حداکثر مقادیر تخمین زده شده یوسبیله الگوریتم سیال برای محدوده مورد مطالعه

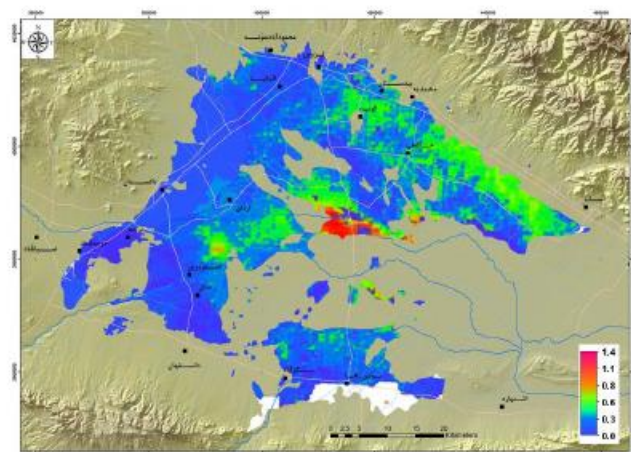
تاریخ	پنمن-مانتیث-فانو (mm/day)	الگوریتم سیال (mm/day)	تفاضل مطلق (mm/day)	تفاضل نسبی (%)	میانگین تفاضل مطلق (mm/day)
۹۲/۰۲/۳۰	۴/۱۱	۴/۳۲	-۰/۲۱	۵/۱۰	۰/۵۰۲
۹۲/۰۳/۰۷	۴/۴۴	۴/۷۳	-۰/۲۹	۶/۵۳	
۹۲/۰۴/۰۱	۸/۲۰	۹/۱۱	-۰/۹۱	۱۱/۱۰	
۹۲/۰۴/۲۰	۸/۱۰	۸/۷۵	-۰/۶۵	۸/۰۲	
۹۲/۰۵/۰۶	۸/۵۰	۸/۹۵	-۰/۴۵	۵/۳۰	

لندست به طور متوسط ۰/۷۳ کیلوگرم بر مترمکعب به دست آمد. بهره‌وری آب به دست آمده از لایسیمتر گندم ۰/۸۵ کیلوگرم بر مترمکعب می‌باشد که نتایج به دست آمده از تصاویر ماهواره را تأیید می‌کند.

در نهایت از تقسیم مقدار ماده خشک تولیدی بر تبخیر و تعرق واقعی (شکل ۴) بهره‌وری آب در سطح دشت حاصل می‌شود (شکل ۵). مقادیر محاسبه شده در سطح دشت از ۰/۱۸ تا ۱/۳۵ کیلوگرم بر مترمکعب متغیر است. میزان بهره‌وری آب برای گندم در دشت با تصاویر



شکل ۴ تبخیر و تعرق روزانه گندم در دشت قزوین در تاریخ ۹۲/۰۲/۳۰



شکل ۵ شاخص بهره‌وری آب گندم (kg/m^3) در دشت قزوین در تاریخ ۹۲/۰۲/۳۰

نتیجه‌گیری

مختلف اقلیمی مورد استفاده قرار گیرد. نتایج بیانگر این است که بیشترین بهره‌وری آب در بخش‌های میانی و شمالی دشت وجود دارد. دامنه تغییرات بهره‌وری آب در سطح دشت بین ۰/۱۸ تا ۱/۳۵ کیلوگرم بر مترمکعب بود. این دامنه وسیع بهره‌وری آب، نیاز به برنامه‌ریزی و مدیریت برای افزایش کارایی مصرف آب و تولیدات کشاورزی را نشان می‌دهد.

تصاویر ماهواره‌ای به عنوان ابزاری نوین و فراگیر امروزی جهت مدیریت آب و خاک در مقیاس بزرگ در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت. نتایج واسنجی و صحت‌سنجی الگوریتم سبال نشان داد که این مدل توانایی بالایی در برآورد تبخیر و تعرق و بهره‌وری آب در منطقه مورد مطالعه داشته و از این رو می‌تواند با دقت مطلوبی در برنامه‌ریزی مدیریت آبیاری در شرایط

فهرست منابع

۱. اسفندیاری‌پور، ا. سایت خبرگزاری ایرنا. ۱۳۹۳. (<http://www8.irna.ir/fa/News/81458438>)
۲. حیدری، ن.، اسلامی، ا.، قدمی فیروز آبادی، ع.، کانونی، ا.، اسدی، م. ا. و خواجه عبدالمهی، م. ح. ۱۳۸۴. تعیین کارایی مصرف آب محصولات زراعی مختلف کشور (کرمان، همدان، مغان، گلستان، خوزستان). موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی.
3. Allen, R. Morse, A. Tasumi, M. 2003. Application of SEBAL for western US water rights regulation and planning. ICID workshop on remote sensing of ET for large regions.
4. Allen, R.G., Tasumi, M., Trezza, R., Bastiaanssen, W., Morse, T., Kramber, W., and Wright, J. 2005. METRIC, T., High Resolution Satellite Quantification of Evapotranspiration. Part Two- Energy Balance, University of Idaho, Kimberly, Idaho.
5. Bastiaanssen W.G.M. 2000. SEBAL- based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz basin, Turkey. *Journal of Hydrology*, 229: 87-100.
6. Bastiaanssen W.G.M., Allen, R., Tasumi, M., Trezza, R., and Waters, R. 2002. SEBAL: Surface Energy Balance Algorithms for Land. Advance Training and Users manual Version 1.0. 98 pp.
7. Bastiaanssen W.G.M., R.A. Feddes, A.A.M. Holtslag, M. Menenti. 1998. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) 1. Formulation. *J. Hydrol.*, 212-213: 198-212.
8. Bastiaanssen W.G.M., Samia. 2003. A new crop yield forecasting model base of satellite measurements applied across the Indus Basin, Pakistan, *Agriculture Ecosystems and Environment* Volum: (94) pp: 321-340.
9. Horiguchi, I. 1992. *Agricultural Meteorology*. Buneidou, Tokyo, Japan.
10. Li Hongium, Li Zheng, Yuping Lei, Chunqiang Li, Zhijun Liu, Shengwei Zhang, 2008, Estimation of water consumption and crop water productivity of winter wheat in north china plain using remote sensing technology. *Agric Water Manag.* Doi:10.1016/J.agwat.2008.05.003.
11. Markham, B.L. and Barker, J.L. 1986. LANSAT MSS and TM post-calibration dynamic ranges, exoatmospheric reflectances and at-satellite temperatures, EOSAT LANDSAT Tech. Notes (Aug.): 3-8.
12. Molden, D., 1997. Accounting for water use and productivity. SWIM Paper 1. International Irrigation Management Institute, Colombo, Sri Lanka.
13. Ramos, J. G., Cratchley, C.R., Kay, J.A., Casterad, M.A., Martinez-cob, A. and Dominguez, R. 2009. Evaluation of satellite evapotranspiration estimates using ground-meteorological data available for the Flumen District into the Ebro valley of N.E. Spain. *Agricultural Water Management*, 96 (2009), 638-652.
14. Singh, R. 2005. Water productivity analysis from field to regional scale: Integration of crop and soil modeling, remote sensing, and geographical information. Ph.D. Dissertation, Wageningen Univ., Wageningen, The Netherlands.
15. Vazifedoust, M., Van Dam, J.C., Feddes, R.A. and Feizi, M. 2008. Increasing Water Productivity of Irrigated crops under limited water supply at field scale. *Agri. Water Manag.* Vol 95, 89-102.
17. Zwart, S.J., Bastiaanssen, W.G.M., 2004. Review of measured crop water productivity values for irrigated wheat, rice, cotton and maize, *Agricultural water management*, Vol. 69, 115-133.

18. Yang, W., Shabanov, N.V., Huang, D., Wang, W., Dickinson, R.E., Nemani, R.R., Knvazikin, Y., and Myneni, R.B. 2006. Analysis of Leaf Area Index products from combination of MODIS Terra and Aqua data. *Remote Sensing of Environment*, 104: 297-312.