رطوبت خاک، یکی از مهم‌ترین متغیرهای خاک در مطالعات و مدیریت منابع آب و خاک است. رطوبت خاک، از نوع متغیرهای زمانی و مکانی است و یکی از اجزای مهم مدل‌های هیدرولوژی، اکولوژی و آب‌وهوایی محسوب می‌شود. (محدوده تغییرات رطوبت خاک، بسیار زیاد است و از چند سانتی‌متر تا چندین کیلومتر از نظر مکانی و از چند دقیقه تا چندین سال در مقیاس زمانی تغییر می‌کند. تغییرات مکانی و زمانی رطوبت خاک، یک موضوع مهم برای تشریح بسیاری از فرآیندهای مهم چرخه هیدرولوژی مانند تغییرات بارش- رواناب، تغذیه آبخوان‌ها و انتقال آلودگی‌ها در منطقه اشباع، محسوب می‌شود (ورکن و همکاران، ۲۰۰۸). اندازه‌گیری‌های طولانی‌مدت تغییرات زمانی و مکانی رطوبت، ورودی بسیار مهم برای مدل‌هایی هستند که احتیاج به داده‌های رطوبت خاک دارند تا این مدل‌ها در مقیاس واحد هیدرولوژیکی و حوزه آبخیز، قابل استفاده باشند.

این متغیر به‌عنوان یکی از مؤلفه‌های چرخه هیدرولوژیکی، تنها بخش اندکی (تنها ۰/۱۵ درصد) از آب شیرین جهان را شامل می‌شود؛ ولی تأثیر بسزایی روی میزان ذخیره آب در چرخه هیدرولوژی دارد. رطوبت خاک، اهمیت اساسی در فرآیندهای بیولوژیکی و بیوشیمیایی نیز دارد و یک متغیر کلیدی محسوب می‌شود که تأثیر بسزایی در جابجایی آب و انرژی بین سطح زمین و اتمسفر دارد.

از طرفی، شاخص سطح برگ (LAI) نیز یک پارامتر مهم در بسیاری از مدل‌های اقلیمی و اکولوژیکی است و به‌طور آشکار، روی مبادلات ماده و انرژی در بین جو و سطح زمین اثر می‌گذارد. بنابراین نمایش دقیقی از تغییرات مکانی و زمانی شاخص LAI، می‌تواند باعث بهبود تخمین بیلان آب سطحی شود و در نتیجه موجب بهبود تخمین میزان جنگل‌زدایی و تأثیر گرمایش جهانی در شرایط آب و هوایی منطقه‌ای و جهانی شود. کاهش مقدار LAI، باعث کاهش در میزان تعرق می‌شود و روی چرخه هیدرولوژیکی و بیوشیمیایی تأثیر می‌گذارد، زیرا سطح برگ، اولین محلی است که ماده و انرژی در تبادل است و فرآیندهای مهمی مانند گیرش گیاهی، فتوسنتز، تبخیروتعرق و نفوذ، مستقیماً به LAI بستگی دارند. شاخص مذکور، از طریق کنترل تبخیروتعرق، روی بیلان آب تأثیر می‌گذارد. در نتیجه، تعیین مقدار صحیح آن در مطالعات توازن هیدرولوژیکی آب و مدیریت منابع آب، بسیار حائز اهمیت است.

رابطه LAI با رطوبت خاک و بیلان آب، ارتباطی پویا است؛ چرا که هنگامی که میزان رطوبت خاک در حد اشباع است، مقدار تبخیر از سطح خاک حداکثر است و معادل تبخیر از سطح آب آزاد درنظر گرفته می‌شود. در گذشته برای اندازه‌گیری LAI و رطوبت خاک، بیشتر از روش‌های سنتی استفاده شده که در مقیاس محلی، دارای دقت قابل پذیرشی بوده‌اند؛ اما این روش‌ها، بسیار پرزحمت، مخرب و هزینه‌بر هستند و قادر به ارائه تغییرات مکانی و زمانی به نحو مطلوب نیستند؛ بنابراین تلاش می‌شود مقادیر LAI با استفاده از روش‌های نوین به‌ویژه در سطوح بزرگ، به‌منظور ایجاد ارتباط بین شاخص‌های گیاهی، تخمین زده شود.

از جمله روش‌های نوین در تعیین شاخص سطح برگ، استفاده از سنجش از دور است. اندازه‌گیری‌های سنجش از دور نیز، نیازمند اطلاعاتی در مورد آب و هوا، خاک و پوشش گیاهی است که با کمک این شیوه می‌توان داده‌ها را سریع، با هزینه کم، دقت مناسب، قدرت تفکیک مکانی و زمانی بالا در یک سطح پوشش وسیع تهیه کرد. امروزه با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، اطلاعات جامعی به‌منظور بررسی تغییرات در طول زمان در مقیاس‌های بزرگ فراهم می‌گردد که این امر، باعث بهبود تخمین‌ها شد و از جمله مهم‌ترین مزیت‌های کاربرد سنجش از دور است (چن و چیلار[۱]، ۱۹۹۶).

با توجه به مسائل مطرح شده، رطوبت خاک و شاخص سطح برگ دو مؤلفه بسیار مهم در چرخه هیدرولوژیکی محسوب می‌شوند و داشتن اطلاعات دقیق از آن‌ها، منجر به برآورد دقیق متغیرهای هیدرولوژیکی می‌شود. همچنین تعیین ارتباط بین شاخص سطح برگ و تغییرات زمانی و مکانی رطوبت خاک در مقیاس‌های زمانی و مکانی مختلف بسیار مهم است و از این طریق می‌توان با داشتن شاخص سطح برگ، مقدار رطوبت خاک را به‌دست آورد.

در این تحقیق با توجه به بررسی منابع و مطالعات گذشته و استفاده از شیوه‌های مدرن؛ تلاش شده تا از تلفیق مدل‌های هیدرولوژیکی و سنجش از دور، تغییرات رطوبت خاک و LAI به‌منظور برآورد رطوبت خاک استفاده شود و از طریق معادلات بیلان آب و انرژی تأثیر این عوامل روی فرآیندهای چرخه هیدرولوژیکی بررسی و تأثیر خطاهای برآوردی مدل‌سازی رطوبت خاک بر مدل‌سازی هیدرولوژی بررسی شوند.

.....

رطوبت خاک، نقش بسیار حیاتی در تعاملات اتمسفر- سطح زمین از طریق تعدیل جریان انرژی و آب به‌واسطه تبخیروتعرق، ایفا می‌کند و از این طریق، تأثیر بسزایی روی بیلان آب دارد. این مؤلفه، باعث تنظیم میزان آب در دسترس گیاه و تعدیل آب بین رواناب سطحی و نفوذ می‌شود. لذا برآورد رطوبت خاک، از گام‌های نخستین برای شناسایی خصوصیات طبیعی و توان‌های ویژه منطقه مورد نظر و بهره‌برداری بهینه از امکانات آن به طریق علمی است. اطلاع از میزان رطوبت خاک در تعیین نقشه‌های رطوبت خاک، پیش‌بینی هواشناسی، تعیین خشکسالی، سیل، آب و هواشناسی، هیدرولوژی و فرآیندهای سطح زمین و سایر پدیده‌های اقلیمی، کمک بسیار زیادی می‌کند. همچنین رطوبت خاک، نقش جدی در کنترل شرایط زراعی و تبادل انرژی بین سطح و اتمسفر دارد و تغییرات آن، تأثیرات مهمی روی رواناب منطقه‌ای و فرسایش زمین می‌گذارد و برآورد نادرست رطوبت خاک، باعث برآورد ناصحیحی از میزان رواناب منطقه خواهد شد (چن[۲]، ۲۰۱۴). بنابراین شناسایی

۱. Chen & Chilar
۲. Chen

بهترین روش در برآورد رطوبت خاک از بین روش‌های موجود، به محقق کمک می‌کند که برآورد دقیقی از بیلان آبی منطقه داشته باشد. زمانی که برآوردها از اجزای بیلان آب، صحیح باشد؛ می‌توان روش‌های مدیریتی صحیحی برای حوضه مورد بررسی ارائه داد.

همان‌طور که قبلاً اشاره شد، یکی از روش‌های مورد استفاده در تعیین رطوبت خاک، استفاده از شاخص سطح برگ است. شاخص سطح برگ، یک متغیر کلیدی در مدل‌های تبخیروتعرق و یک پارامتر تأثیرگذار در چرخه هیدرولوژیکی است؛ به این صورت که شاخص سطح برگ از طریق کنترل تغییرات رطوبت خاک و تبخیروتعرق، بیلان آب را تحت تأثیر قرار می‌دهد (رانینگ و کوقلان[۳]، ۱۹۸۸؛ آبر و فدرر[۴]، ۱۹۹۲؛ آلبرتسون و کیلی[۵]، ۲۰۰۱؛ جانک[۶] و همکاران، ۱۹۸۹). به بیان دیگر، افزایش در میزان شاخص سطح برگ، منجر به افزایش نرخ تبخیروتعرق می‌شود و افزایش در تبخیروتعرق، باعث کاهش رطوبت خاک می‌شود (پیلک[۷]، ۲۰۰۱؛ کرگوت[۸]، ۲۰۰۲).

بنابراین با توجه به مسائل مطرح شده، اندازه‌گیری شاخص سطح برگ و رطوبت خاک بسیار حائز اهمیت است. روش‌های متفاوتی برای اندازه‌گیری این دو مؤلفه وجود دارد که می‌توان با استفاده از ترکیب داده‌های پوشش گیاهی، رطوبت خاک، تبخیروتعرق و ... حاصل از اندازه‌گیری‌های میدانی و سنجش از دور، یک دید کلی نسبت به شرایط حاکم در منطقه فراهم کرد تا در پیش‌بینی اجزای کلیدی چرخه هیدرولوژیکی و مدیریت صحیح منابع آب، استفاده شود (ورکن و همکاران، ۲۰۱۴). البته اندازه‌گیری‌های مستقیم در اکثر موارد، یک کار بسیار پرهزینه، وقت‌گیر و در برخی موارد، زیان‌بار برای طبیعت است و لذا برای رسیدن به نتایج مطلوب، از روش مدل‌سازی استفاده می‌شود. در برخی از مدل‌ها روش‌های برآورد LAI، جدول‌های استانداردی وجود دارد که با داشتن کاربری اراضی، مقدار شاخص سطح برگ استخراج می‌شود. از آن‌جایی‌که چنین جدول‌های استانداردی برای بسیاری از کاربری‌های کشور در دسترس نیست یا آن‌که برای کشور ایران توسعه داده نشده‌اند، برآوردهای غیرواقعی ارائه می‌کنند. لذا انجام این تحقیق می‌تواند استانداردی برای نیازها فراهم نماید.

همچنین علی‌رغم نیازهای چندگانه، لایه اطلاعاتی با کیفیت به نام متوسط شاخص سطح برگ فصلی در کشور موجود نیست که حداقل تغییرات فصلی این پارامتر مهم را منعکس کند. اکثر اطلاعات موجود در این

---

۳. Running & Coughlan
۴. Aber & Federer
۵. Albertson & Kiely
۶. Janecek
۷. Pielke
۸. Kergoat

زمینه، بر پایه سنجش از دور است که ضمن دقت تفکیک پایین، کنترل زمینی خوبی روی آن‌ها انجام نشده است. البته انجام این پروژه در سطح کلان نیاز به نیروی انسانی و ادوات مناسبی دارد. بنابراین با توجه به وجود چنین محدودیت‌هایی، تحقیق حاضر برای حوزه آبخیز بهشت‌آباد به‌عنوان یک محدوده مطالعاتی پیشنهاد شده است.

رطوبت خاک، یکی از مهم‌ترین متغیرهای خاک در مطالعات و مدیریت منابع آب و خاک است و تأثیر بسزایی در جابجایی آب و انرژی بین سطح زمین و اتمسفر دارد. شاخص سطح برگ (LAI) نیز، یک پارامتر مهم در بسیاری از مدل‌های اقلیمی و اکولوژیکی است و به‌طور آشکار، روی مبادلات ماده و انرژی در بین جو و سطح زمین اثر می‌گذارد. رابطه LAI با رطوبت خاک و بیلان آب، ارتباطی پویا است. در این تحقیق، به‌منظور ارزیابی ارتباط LAI با تغییرات زمانی و مکانی رطوبت خاک، حوزه آبخیز بهشت‌آباد به‌عنوان منطقه مطالعاتی طی دوره زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۵ انتخاب شد. برای رسیدن به این هدف، طی یک دوره رویشی (اکتبر ۲۰۱۶ تا اکتبر ۲۰۱۷) داده‌های رطوبت‌خاک و LAI طی یک دوره رویشی به مدت ۹ ماه نمونه‌برداری شدند؛ همچنین تصاویر ماهواره‌ای LAI و پوشش برف تهیه و اصلاح شدند. به‌منظور ارزیابی تغییرات زمانی رطوبت خاک، سری‌های زمانی دما، بارش، LAI، تعداد روزهای بارندگی و مساحت پوشیده از برف (m2) به مدت ۱۵۶ ماه به‌عنوان ورودی به مدل ونسیم ارائه شد. پس از واسنجی و صحت‌سنجی، سری‌های زمانی تبخیروتعرق پتانسیل، تبخیروتعرق واقعی، برگاب، رواناب سطحی، نفوذ سطحی، بارش مؤثر، رطوبت خاک، رواناب زیرسطحی، تغذیه، جریان کارست، جریان پایه و دبی کل به‌دست آمدند. نتایج نشان داد که مدل پویای توسعه داده شده در محیط ونسیم، قادر به شبیه‌سازی خوب جریان پایه و دبی کل است.

به‌منظور ارزیابی تغییرات مکانی رطوبت خاک، از طریق فرموله کردن و برنامه‌نویسی در محیط برنامه‌نویسی پایتون، مدل توزیعی و ماهانه SM ارائه شد. ورودی‌های مدل SM عبارتند از نقشه‌های بارندگی، دما، LAI، کاربری اراضی، شیب، ارتفاع و خاک و سری‌های زمانی تعداد روزهای بارندگی و مساحت پوشیده از برف. پس از واسنجی و صحت‌سنجی، نقشه‌های تبخیروتعرق پتانسیل، تبخیروتعرق واقعی، برگاب، رواناب سطحی، نفوذ سطحی، بارش مؤثر، رطوبت خاک و سری‌های زمانی جریان زیرسطحی، جریان پایه و دبی کل به‌صورت ماهانه به‌دست آمدند. نتایج این بخش تحقیق نشان داد که مدل SM قادر به شبیه‌سازی خوب جریان پایه و دبی کل است. نتایج بررسی رابطه بین LAI و رطوبت خاک در حوزه آبخیز بهشت‌آباد نشان داد که رطوبت خاک با تأخیر زمانی ۴ ماهه بر روی LAI اثر می‌گذارد. علاوه براین، سایر نتایج نشان داد که مقادیر LAI حاصل از سنجش از دور، دقت لازم و کافی را دارا هستند و می‌توان از این محصولات در مطالعات آتی استفاده نمود.