



مرکز تحقیقات آموزش و منابع کشاورزی و منابع شیخ فارس

پژوهش‌های آبخیزداری

شاپا: ۲۰۳۸-۲۹۸۱



مژده با هم
کشاورزی
جهد

تعیین تغییرات بیلان آب و انرژی در مقیاس‌های مختلف زمانی با استفاده از منحنی بودیکو در آبخیز نیر، اردبیل

رئوف مصطفی‌زاده^{۱*}، نازیلا علانی^۲، فاطمه کاتب^۳

- ۱ - دانشیار، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده‌ی کشاورزی و منابع طبیعی، عضو پژوهشکده‌ی مدیریت آب، دانشگاه محقق اردبیلی اردبیل، ایران
- ۲ - دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده‌ی منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
- ۳ - دانش‌آموخته‌ی کارشناسی‌ارشد مهندسی آبخیزداری، دانشکده‌ی کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

چکیده‌ی مبسوط

مقدمه و هدف

فهم درست مؤلفه‌ها و تغییرات بیلان آب در مطالعه‌های آب‌شناختی و منابع آب اهمیت قابل توجهی دارد. تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی بر تغییرات رواناب، مدیریت منابع آب و توسعه‌ی پایدار جامعه تأثیرگذار است. در این راستا، این پژوهش با هدف تعیین و مقایسه‌ی تغییرات بیلان آب با استفاده از منحنی بودیکو در استان اردبیل در آبخیز نیر، انجام شد.

مواد و روش‌ها

منحنی بودیکو برای آبخیز نیر در مقیاس‌های زمانی ماهانه (فصلی و سالانه) محاسبه شد. در این پژوهش، از داده‌های یک دوره‌ی آماری ۳۳ ساله‌ی ایستگاه باران‌سنجی و تبخیرسنجی آبخیز نیر برای محاسبه‌ی میانگین بارش و تبخیر-تعرق بالقوه استفاده شد. منحنی بودیکو، یک رابطه‌ی غیرخطی است که با محدودیت‌های فیزیکی تقاضای آب جوی ($PET > ET$) و عرضه ($P > ET$) محدود می‌شود و شاخص خشکی در منحنی بودیکو تعادل بلندمدت آب را نشان می‌دهد.

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: raofmostafazadeh@uma.ac.ir

استناد: مصطفی‌زاده، ر.، علانی، ن.، کاتب، ف. ۱۴۰۳. تعیین تغییرات بیلان آب و انرژی در مقیاس‌های مختلف زمانی با استفاده از منحنی بودیکو در آبخیز نیر، اردبیل. پژوهش‌های آبخیزداری، ۳۷ (۲): ۵۴-۳۹
شناسه‌ی دیجیتال: 10.22092/wmrj.2023.362093.1538

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۰۶، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۳/۲۶، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۳۱، تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۴/۰۱
پژوهش‌های آبخیزداری، سال ۱۴۰۳، دوره‌ی ۳۷، شماره ۲، شماره‌ی پیاپی ۱۴۳، تابستان ۱۴۰۳، صفحه‌های ۳۹ تا ۵۴.

©نویسندگان

ناشر: مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس



نتایج و بحث

نتایج نشان داد که روند تغییرات جریان رود در مقیاس سالانه به شکل مستقیم با تغییرات مؤلفه‌های آب و هوایی ارتباط داشت. این در حالی بود که بر اساس داده‌های واقعی، فقط در تعدادی از فصل‌ها روند تغییر جریان از تغییر مؤلفه‌های اقلیمی تبعیت می‌کرد. هم‌چنین در سال‌های مطالعه‌شده، توزیع داده‌ها در منحنی بودیکو بیانگر آن بود که اندازه‌ی مصرف آب در آبخیز نیر از محدوده‌ی پیش‌بینی شده بر اساس منحنی بودیکو، به انرژی و تعادل آب، دچار انحراف شده است. بیشترین و میانگین و حداقل ET برای سال‌های بررسی شده به ترتیب ۸۷۶/۵۵، ۴۳۱/۸۵ و ۲۷۷/۸۸ به دست آمد. هم‌چنین بیشترین و میانگین و حداقل نسبت PET/P به ترتیب ۰/۰۷، ۰/۰۵ و ۰/۰۲ بود. بیش‌تر سال‌های مطالعه‌شده داده‌های مشاهداتی روی منحنی بودیکو در محدوده‌ی محدودیت آب قرار داشتند، که در آن، اندازه‌ی مصرف آب مشاهده‌شده (AET/P) برابر با پیش‌بینی مصرف آب (PET/P) بود. بر اساس نتایج، تغییرات در AET/P در سال‌های (۱۳۶۰، ۱۳۶۲، ۱۳۶۸، ۱۳۷۳، ۱۳۸۶ و ۱۳۸۹) کم‌تر بود. بر اساس تغییرات در اندازه‌های PET/P و AET/P نسبت به منحنی بودیکو می‌توان در خصوص توانایی آبخیز در تنظیم AET قضاوت کرد.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

نتایج این پژوهش نشان داد که با افزایش دما و کاهش بارش، اندازه‌ی تبخیر-تعرق واقعی سالانه آبخیز افزایش یافت و منجر کاهش رواناب در آبخیز شد. این نتایج می‌تواند برای پیشنهاد راهکارهای مدیریتی و سازگار با اقلیم در راستای استفاده‌ی بهینه از منابع آب به کار گرفته شود. سرانجام می‌توان گفت که اندازه‌ی تبخیر-تعرق بالقوه در آبخیز مطالعه‌شده از اندازه‌ی بارش بیش‌تر بود. نتایج این پژوهش می‌تواند برای مدیریت منابع آب با در نظر گرفتن محدودیت‌های تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسانی به کار گرفته شود.

واژگان کلیدی: تبخیر-تعرق بالقوه، جریان رود، مدیریت منابع آب، معادله بیلان، مؤلفه‌های اقلیمی

مقدمه

آب و هوایی ناشی از فعالیت‌های انسانی تأثیرگذار باشد. حتی در بوم‌نظام‌های آب شیرین نیز، عامل‌های اجتماعی از جمله پویایی جمعیت، توسعه‌ی اقتصادی، درگیری‌های سیاسی و سیاست‌های استفاده از منابع، باعث ایجاد اختلال در بوم‌نظام از جمله حذف جنگل، تغییر کاربری زمین‌ها و سیمای سرزمین، چرای دام، کشاورزی، معدن و آتش‌سوزی می‌شوند (طالبی‌خیای و مصطفی‌زاده ۲۰۲۱). این اختلال‌ها می‌توانند بر تغییرات زیست‌محیطی، تبخیر-تعرق و جریان اثرگذار باشند (جانس و همکاران ۲۰۱۲؛ مصطفی‌زاده و همکاران ۲۰۲۳). ارزیابی جامع توزیع بارش، اندازه‌ی تبخیر-تعرق و رواناب اهمیت زیادی در دامنه‌ی گسترده‌ای از بخش‌های اجتماعی و اقتصادی دارد (گریو و همکاران ۲۰۱۶). در میانگین سالانه‌ی تعادل بلندمدت آب مقیاس آبخیز، چرخه‌ی آب‌شناختی و توازن انرژی با هم، پراکندگی میانگین بارش سالانه، تغییرات تبخیر-تعرق و رواناب را تحت تأثیر قرار می‌دهند (نصیری و همکاران ۲۰۲۰؛ جریس و همکاران ۲۰۰۹). بودیکو (۱۹۷۴) پیشنهاد کرد رابطه‌ی میان میانگین سالانه‌ی نسبت تبخیر به بارش سالانه (E/P) و تبخیر-تعرق بالقوه به میانگین شاخص بارندگی سالانه

فعالیت‌های انسانی پیوسته در حال تغییر سیمای زمین است و این فعالیت‌ها نیز به شکل مستقیم بر برداشت آب از رودها یا آب‌های زیرزمینی تأثیرگذار است. آب و هوا، عامل‌های اصلی حاکم بر تعادل آب در بلندمدت در یک آبخیز هستند که می‌توانند الگوهای بارش و دما را تغییر دهند (ژانگ و همکاران ۲۰۱۹). از عامل‌های تأثیرگذار بر پاسخ آب‌شناختی یک آبخیز، تغییر اقلیم و مداخلات انسانی هستند (مصطفی‌زاده و همکاران ۲۰۲۲؛ شیخ و همکاران ۲۰۲۳). در مطالعه‌های آب‌شناختی و منابع آب فهم درست و درک دقیق از مبحث بیلان آب اهمیت بسیاری دارد. یکی از اصلی‌ترین و ابتدایی‌ترین اقدام‌ها در فرآیند مدیریت درست منابع آب، به‌ویژه در نواحی خشک، تدوین صحیح بیلان آبی است (امامی‌فر و همکاران ۲۰۱۸). تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی در تغییرات رواناب، مدیریت منابع آب و توسعه‌ی پایدار جامعه اهمیت زیادی دارند (لی و همکاران ۲۰۱۹). تبخیر یک مؤلفه بسیار مهم در چرخه‌ی آب شناختی است و سبب پیوند تعادل آب و انرژی در یک آبخیز می‌شود (مانابادی و همکاران ۲۰۱۹). سامانه‌های اجتماعی عامل اصلی تغییر جریان در استفاده از آب و تنظیم آب هستند و ممکن است به شکل غیرمستقیم بر تغییرات

از آن برای تعدیل پیامدهای ناخوشایند تغییر اقلیم، کاهش منابع آب و کاهش تنش‌های آبی میان سودبران استفاده کرد (میان‌آبادی و همکاران ۲۰۱۶). منحنی بودیکو به‌عنوان اولین برآورد از تبخیر سالانه می‌تواند به‌شکل تابعی از بارش سالانه و تبخیر بالقوه استفاده شود (میان‌آبادی و همکاران ۲۰۱۹). اگر انرژی برای تبخیر رطوبت موجود در خاک کافی باشد، آنگاه تبخیر می‌تواند از اندازه‌ی بارش سالانه نیز بیشتر شود که در این شرایط اندازه‌ی آب را با محدودیت مواجه خواهد کرد. کاربرد معادله‌ی بودیکو برای تقسیم‌بندی ساده اما مؤثر بارش به رواناب و تبخیر-تعرق، در آبخیزهای طبیعی پرشماری در سراسر جهان تأیید شده است (سنکراس برامین و همکاران ۲۰۲۰؛ فتحی و همکاران ۲۰۱۹). منحنی بودیکو ابتدا برای برآورد تبخیر واقعی به‌عنوان تابعی از بارش و شاخص خشکی در شرایط پایدار ایجاد شد (بودیکو ۱۹۷۴). فرضیه‌ی بودیکو برآورد اولیه از رواناب (Q) و تبخیر-تعرق (ET) است (فنگ و همکاران ۲۰۱۶). منحنی بودیکو اغلب برای ارزیابی اولیه‌ی تغییرات آب‌دهی جریان استفاده می‌شود، زیرا یک مدل ساده است که فقط به داده‌های ورودی بارندگی و تبخیر بالقوه نیاز دارد. بسیاری از پژوهش‌گران تلاش کرده‌اند با استفاده از ویژگی‌های فیزیکی آبخیز (مانند مساحت، پوشش گیاهی، ذخیره‌ی سطحی و نوع خاک)، معادله‌ی اصلی رویکرد بودیکو را بیش‌تر بهبود بخشند، که این کار منجر به تولید سنج‌های اضافی ناشناخته یا دشوار شده است (مانابادی و همکاران ۲۰۱۹).

در این راستا، جریتس و همکاران (۲۰۰۹)، برای ۱۰ آبخیز با شرایط آب و هوایی گوناگون، تبخیر را مبتنی بر آستانه‌ی عبور و برانگیختگی ساده در ترکیب با سنج‌های قابل اندازه‌گیری (مانند پویایی بارش و اطلاعات در دسترس و ذخیره‌سازی شده‌ی سنجش از دور)، بررسی کردند. نتایج این پژوهش‌گران نشان داد که مجموع تبخیر برآورد شده به‌وسیله‌ی مدل Gerrits، همبستگی مناسبی با STEAM، Landflux-EVAL و GLEAM^۲ داشت. هم‌چنین، داده‌های برآورد شده‌ی مدل Gerrits در مقایسه با STEAM کم‌تر از محدوده‌ی پیش‌بینی شده بر اساس منحنی بودیکو بود و در مقایسه با رویکرد بودیکو، این مدل عملکرد خوبی در برآورد کل تبخیر نشان داد. در ایالات متحده و کانادا، در ۳۵ آبخیز، جانس و همکاران (۲۰۱۲) فرآیندهای بوم‌نظام و تأثیرات انسانی را با استفاده از منحنی بودیکو بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که دمای هوا (با سابقه‌ی ۲۰

(PET/P) برای توصیف تعادل آب و انرژی در دوره‌های بلندمدت کاربرد دارد (فو و ونگ ۲۰۱۹). بودیکو بر اساس مشاهد‌هایی از سراسر جهان فرض کرد که E/P عمدتاً به‌وسیله‌ی PET/P مهار می‌شود. سپس برای اندازه‌گیری رابطه‌ی میان E/P و PET/P بسیاری از رابطه‌های فرضیه‌ی بودیکو گسترش داده شد (ونگ و تنگ ۲۰۱۴). منحنی بودیکو مشخص می‌کند که تبخیر-تعرق واقعی (ET) می‌تواند به‌عنوان تابعی از آب و انرژی موجود محاسبه شود. از زمان توسعه‌ی منحنی بودیکو، برای گسترش رویکرد بودیکو تلاش‌هایی شده است و عامل‌های تعیین‌کننده‌ی دیگری برای این منحنی به جز از اقلیم منطقه‌ای، پیشنهاد شده است (لی و همکاران ۲۰۲۳). فو (۱۹۸۱) معادله دیگری از منحنی بودیکو را پیشنهاد داد. در ابتدا، فرض بر این بود، که منحنی هیچ سنج‌های اضافی ندارد و برای آبخیزهای بزرگ و مقیاس بلندمدت مناسب است (نینگ و همکاران ۲۰۱۹). از مؤلفه‌های مهم معادله‌ی بیلان آب و انرژی در آبخیزها تبخیر-تعرق است که اندازه‌گیری آن به‌راحتی امکان‌پذیر نیست. با توجه به اهمیت اندازه‌های تبخیر در بررسی بیلان آب و مدل‌سازی آب‌شناسی (هیدرولوژی) در سطح آبخیز، معادله‌های تجربی و فیزیکی و مدل‌های آب‌شناسی مختلفی برای برآورد تبخیر واقعی به‌وسیله‌ی پژوهش‌گران پیشنهاد شده است (جریتس و همکاران ۲۰۰۹). یکی از مدل‌های یکپارچه‌ی ساده که کاربرد آن در سطح جهان گسترش زیادی یافته، منحنی‌های بودیکو است. منحنی‌های بودیکو برای آبخیزهایی با شرایط پایدار که در آنها تغییرات ذخیره‌ی آب ناچیز فرض می‌شود، قابل استفاده است (میان‌آبادی و همکاران ۲۰۱۶). منحنی بودیکو اغلب برای برآورد تبخیر واقعی به‌عنوان عملکرد شاخص خشکی در یک آبخیز استفاده می‌شود. معادله‌های تجربی گوناگونی برای توصیف این رابطه وجود دارد. با این حال، این معادله‌ها پس از زمین‌های فیزیکی بسیار محدودی دارند. منحنی بودیکو تجربی می‌تواند بر اساس سنج‌های قابل اندازه‌گیری که نشان‌دهنده‌ی اندازه‌ی آستانه‌ی تبخیر و تعداد روزهای بارانی است، تهیه شود (ترانسکو و همکاران ۲۰۱۶). با توجه به فرضیه‌ی بودیکو، تغییرات در تبخیر-تعرق واقعی ممکن است به‌دلیل تغییر در بارش، تبخیر-تعرق بالقوه و عامل شکل منحنی بودیکو باشد (جولیا و همکاران ۲۰۱۲). منحنی بودیکو برای برآورد تبخیر و رواناب آبخیزها می‌تواند در برنامه‌ریزی‌های بلندمدت در همه آبخیزهای کشور استفاده شود. همچنین می‌توان

1 - Simple Terrestrial Evaporation to Atmosphere Model

2 - Global Land Evaporation Amsterdam Model

گرفتند که عامل اصلی کاهش آب‌دهی رودهای آبخیز حبله‌رود مداخلات انسانی بود و تغییر اقلیم در کاهش آب‌دهی رودهای آبخیز حبله‌رود سهم قابل ملاحظه‌ای نداشت. هم‌چنین، برپایه‌ی نتایج این پژوهشگران در زیرآبخیز دلیچای، مداخلات انسانی تأثیر شدیدتری بر کاهش آب‌دهی رودهای آبخیز حبله‌رود داشتند.

در اکثر آبخیزهای کشور یکی از مشکلات اساسی در معادله‌ی بیلان آب و انرژی، نبودن برآورد مناسب از تبخیر-تعرق واقعی است. از این رو، به‌نظر می‌رسد با توجه به سادگی منحنی بودیکو و نیاز به داده‌های کم، می‌توان از منحنی بودیکو برای برآورد تبخیر-تعرق واقعی آبخیزها استفاده کرد (میان‌آبادی و همکاران ۲۰۱۶). برای آبخیزهایی که فاقد داده‌های کافی و مناسب برای اجرای مدل‌های پیچیده آب‌شناختی هستند، استفاده از منحنی بودیکو و یا دیگر مدل‌های مبتنی بر بودیکو با توجه به خصوصیات آبخیز می‌تواند، برآورد قابل قبولی از تبخیر-تعرق واقعی در مقیاس‌های مختلف زمانی و مکانی پیشنهاد دهد (جریس و همکاران ۲۰۰۹؛ نینگ و همکاران ۲۰۱۹). هم‌چنین، در پژوهش‌های پرشماری، از منحنی بودیکو برای تعیین کمیت و تفکیک تأثیر تغییرات آب و هوا و فعالیت‌های انسانی بر رواناب آب‌های سطحی استفاده‌شده است. با بررسی بیلان آب در آبخیزهایی با حداقل دخالت‌های انسانی، می‌توان نقش عامل‌های اقلیمی بر مؤلفه‌های بیلان آب را دقیق‌تر ارزیابی کرد. منطقه‌ی مطالعه‌شده در دامنه‌ی کوهستان سبلان است و تغییر جریان رود مزبور در اثر استفاده‌های انسانی حداقل است. از این رو، در این پژوهش برای آبخیز نیر در استان اردبیل، از منحنی بودیکو به‌دلیل سادگی و نیاز کم به داده‌های بارش، تبخیر-تعرق بالقوه و تبخیر-تعرق واقعی استفاده شد. سپس منحنی بودیکو در مقیاس‌های زمانی سالانه (فصلی و ماهانه) محاسبه شد و برای تحلیل بیلان آبی در آبخیز مزبور استفاده شد.

روش پژوهش

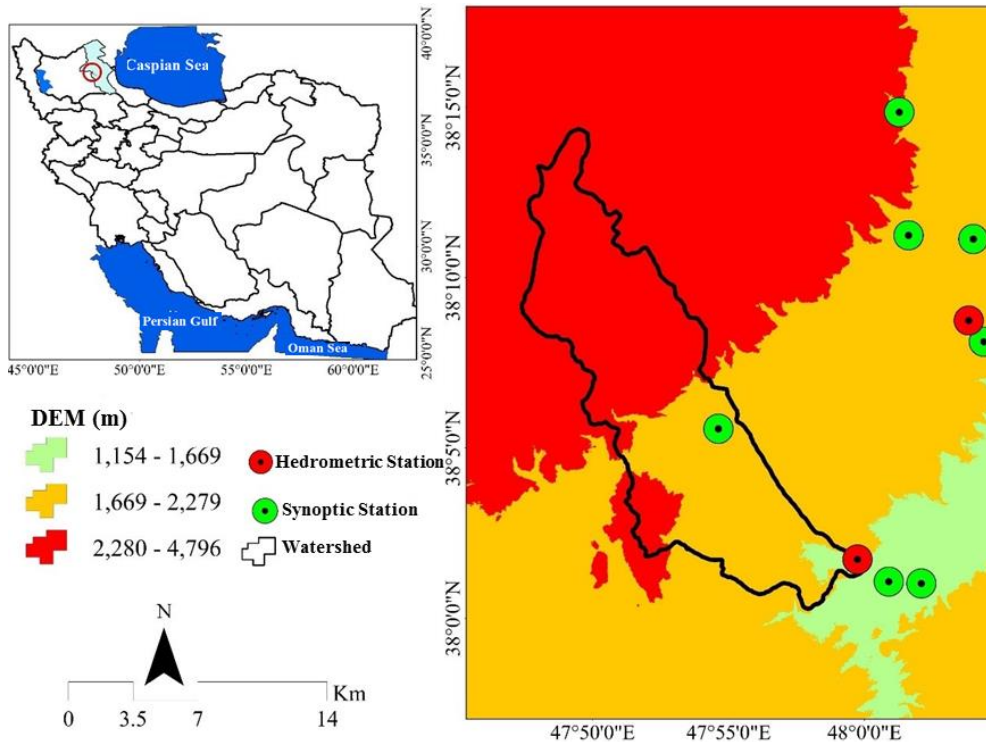
منطقه‌ی مطالعه‌شده

آبخیز نیر، با مساحت ۱۶۲۴۰ هکتار در قسمت شرقی شهرستان اردبیل است. مختصات جغرافیایی این آبخیز، $38^{\circ} 46'$ تا $47^{\circ} 00'$ طول شرقی و $38^{\circ} 01'$ تا $38^{\circ} 00'$ عرض شمالی است. آبخیز نیر از شمال به بلندی‌های سبلان، از جنوب به گردنه‌ی صائین و محدوده‌ی سرشاخه‌ی رود بالغلی‌چای، از غرب به استان آذربایجان شرقی و از شرق به آبخیز رود کمال‌آباد محدود می‌شود. میانگین بلندی از سطح دریا ۲۵۱۶ متر است. بلندترین نقطه‌ی آبخیز ۴۴۰۰ متر در مجاورت قلعه‌ی سبلان در قسمت شمالی آبخیز است. بیشترین، میانگین و حداقل بارش به‌ترتیب

تا ۶۰ ساله) در ۱۷ مکان از ۱۹ جایگاه به‌طور قابل توجهی افزایش یافته است، اما روند جریان رود به‌طور مستقیم با روند تغییر اقلیم (از طریق تغییر در اندازه‌ی یخ و برف) فقط در ۷ جایگاه ارتباط داشت. هم‌چنین، اختلال‌های طبیعی و انسانی در زمان حال و گذشته، تغییر کاربری زمین‌ها و استفاده انسان از آب می‌تواند اثر تغییرات اقلیم را بر رواناب حتی در آبخیزهای مرجع، تشدید یا خنثی کند. در تایوان لی و همکاران (۲۰۲۳) بر اساس رویکرد بودیکو در ارزیابی در دسترس بودن منابع آب در آینده نتیجه گرفتند که در منطقه‌ی مطالعه‌شده متغیرهای بودیکو (مانند شاخص‌های تبخیر و خشکی، و سنجهی آبریز) تنوع زیادی داشت که با تغییر در ویژگی‌های سیمای سرزمین یا فعالیت‌های انسانی تعدیل می‌شوند. گریو و همکاران (۲۰۱۶)، تابع بودیکو دو سنجه‌ای را در شرایطی که تبخیر-تعرق آن بیش از بارندگی است، بررسی کردند و نتیجه گرفتند که اگر منحنی بودیکو با شرایط پایدار محدود شود، اندازه‌ی تغییرات ذخیره در معادله‌ی بیلان ناچیز خواهد بود. برپایه‌ی نتایج این پژوهشگران رویکرد اصلاح‌شده‌ی بودیکو شرایطی را نشان داد که در مقیاس‌های زمانی گوناگون، تبخیر-تعرق ماهانه تا سالانه از بارش ماهانه تا سالانه بیش‌تر بود. در رود یانگ‌تسه، لی و همکاران (۲۰۱۹)، به‌منظور تعیین تغییرات رواناب براساس رویکرد بودیکو، از داده‌های ایستگاه‌های آب‌شناختی و هواشناسی (۲۰۱۳-۱۹۶۶) استفاده کردند. سپس روند تغییر بارش، بلندای رواناب و تبخیر و تعرق بالقوه را با استفاده از آزمون من‌کنندال و ضریب همبستگی، تجزیه و تحلیل کردند. نتایج این پژوهشگران نشان داد که بلندای رواناب، بارندگی، و تبخیر و تعرق بالقوه به‌شکل قابل ملاحظه‌ای افزایش یافت. افزون بر این، نرخ مشارکت مشترک دیگر عامل‌ها کم‌تر از ۲/۵٪ بود. به‌طور کلی، نتایج آنها در این آبخیز نشان داد که بارندگی عامل اصلی تغییر رواناب‌های تاریخی بوده است. در ایران، در آبخیز نیشابور-رخ، میان‌آبادی و همکاران (۲۰۱۹)، با ایجاد یک مدل بودیکو جهانی، از داده‌های بارش، تبخیر بالقوه و تبخیر واقعی برای واسنجی مدل پیشنهادی استفاده کردند. سپس، با استفاده از مدل اقلیمی به‌دست آمده از طرح CORDEX، اندازه‌ی تبخیر برای دوره‌ی پایه و دوره‌ی آینده برآورد شد. نتایج بررسی تغییر اقلیم به‌وسیله‌ی این پژوهشگران نشان داد که اندازه‌ی بارش در دوره‌ی آینده ۴۸٪ کاهش یافت و دمای میانگین، تبخیر-تعرق بالقوه و تبخیر-تعرق واقعی به‌ترتیب ۱۱/۲۵، ۴/۶۶ و ۲/۱۱٪ افزایش یافت. شیخ و همکاران (۲۰۲۳) با استفاده از رویکرد تحلیل حساسیت آب‌شناختی مبتنی بر فرضیه‌ی بودیکو، سهم تغییر اقلیم و مداخلات انسانی در تغییرات آب‌دهی رود حبله‌رود را تعیین کردند و نتیجه

۷۰/۲۹ تن بر کیلومتر مربع در سال است (اسمعی و همکاران ۲۰۱۴).

۳۹۳/۵۰۳، ۷۸/۸۹ و ۳۴۰/۰۷ میلی متر گزارش شده است. میانگین دما ۱۲ °C است. در آبخیز نیر با استفاده از مدل MPSIAC اندازه‌ی میانگین رسوب ویژه‌ی برآورد شده



شکل ۱- موقعیت منطقه‌ی مطالعه‌شده در ایران و استان اردبیل.

Figure 1- The location of the study area in Iran and Ardabil Province.

منحنی بودیکو

فرضیه‌ی بودیکو، بیان آب را به شکل تابعی از اندازه‌ی آب و انرژی موجود بیان می‌کند. با فرض ناچیز بودن تغییرات بلندمدت ذخیره‌ی آب آبخیز، در این پژوهش معادله‌ی بیان آب به شکل رابطه‌ی ۲ ارائه شد.

$$\bar{Q} = \bar{P} + \bar{E}_a \quad (2)$$

\bar{Q} : نشان‌دهنده‌ی میانگین بلندمدت رواناب (میلی‌متر)، \bar{P} : بارش (میلی‌متر) و \bar{E}_a : تبخیر-تعرق واقعی (میلی‌متر) است. برپایه‌ی فرضیه‌ی بودیکو، نسبت تبخیر-تعرق واقعی (E_a) به بارش، تابعی از درجه‌ی خشکی (ϕ) است (ژانگ و همکاران ۲۰۰۹).

$$E_a = P * F(\phi) \quad (3)$$

درجه یا شاخص خشکی یک مقیاس عددی برای تعیین اندازه‌ی خشکی یک منطقه است. در این پژوهش این شاخص به شکل نسبت تبخیر-تعرق بالقوه به بارش با استفاده از رابطه‌ی ۴ محاسبه شد (بودیکو ۱۹۷۴).

داده‌های استفاده‌شده

در این پژوهش، از داده‌های یک دوره‌ی آماری ۳۳ ساله‌ی ایستگاه باران‌سنجی و تبخیرسنجی آبخیز نیز استفاده شد. سپس از این داده‌ها برای محاسبه‌ی میانگین بارش و تبخیر-تعرق بالقوه در آبخیز مزبور استفاده شد. با استفاده از رابطه‌ی میان بارش و دما با بلندی و با استفاده از مدل ارتفاعی رقومی اندازه‌ی میانگین بارش، دما و تبخیر-تعرق بالقوه برای آبخیز نیز به دست آمد. تبخیر-تعرق بالقوه با استفاده از رابطه‌ی تورنویت (رابطه‌ی ۱) محاسبه شد.

(۱)

$$ETP = 16.2 \left(\frac{10T_i}{I} \right)^\alpha$$

$$I = \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{T_i}{5} \right)^{1.514}$$

ETP: تبخیر-تعرق ماهانه (میلی‌متر)، T_i : دمای میانگین ماهانه (درجه‌ی سانتی‌گراد) و I : شاخص حرارتی سالانه (بدون واحد) است.

تبخیر-تعرق سالانه (میلی‌متر) با استفاده از رابطه‌ی ۷ محاسبه شد.

$$AET = P - Q \quad (۷)$$

P: اندازه‌ی بارش (میلی‌متر) و Q اندازه‌ی رواناب (میلی‌متر) است.

در این پژوهش، از معادله‌ی پیشنهادشده بر اساس رویکرد بودیکو استفاده شد و بر اساس این رویکرد اندازه‌ی نفوذ محاسبه شد و سرانجام به شکل جریان پایه در جریان رود ثبت شد.

منحنی بودیکو و محدودیت آب و انرژی در شکل ۲ نشان داده شده است. رویکرد بودیکو بر پایه‌ی جرم و انرژی است و برای مدل سازی و پیش‌بینی متغیر آب‌اقلیم‌شناختی واقعی بر اساس تقاضا و عرضه، استفاده می‌شود. اگر متغیر عرضه نامحدود باشد، اصطلاح تقاضا به عنوان کران بالای متغیر واقعی تعریف می‌شود. منطق استفاده از رویکرد بودیکو برای درک تغییرپذیری فضایی سطح زمین بر آبخیزهای طبیعی/تغییر یافته به وسیله‌ی انسان است و توانایی آن در نمایش دادن ابعاد مرتبط با اقلیم، عرضه و تقاضای آب نهفته است. اگر استفاده از رویکرد بودیکو بر پایه‌ی درک تعادل آب در بلندمدت باشد، چارچوب عرضه و تقاضا می‌تواند برای درک تغییرپذیری فضایی سطح زمین استفاده شود (سنکاراس برامین و همکاران ۲۰۲۰).

$$\phi = \frac{E}{F} \quad (۴)$$

روشن است هر چه اندازه‌ی این شاخص بیش تر باشد، منطقه از دیدگاه اقلیمی، خشک تر خواهد بود. در این پژوهش شاخص خشکی از تابعی مبتنی بر فرضیه‌ی پیشنهادشده‌ی بودیکو (۱۹۷۴) تعیین شد (رابطه‌ی ۵).

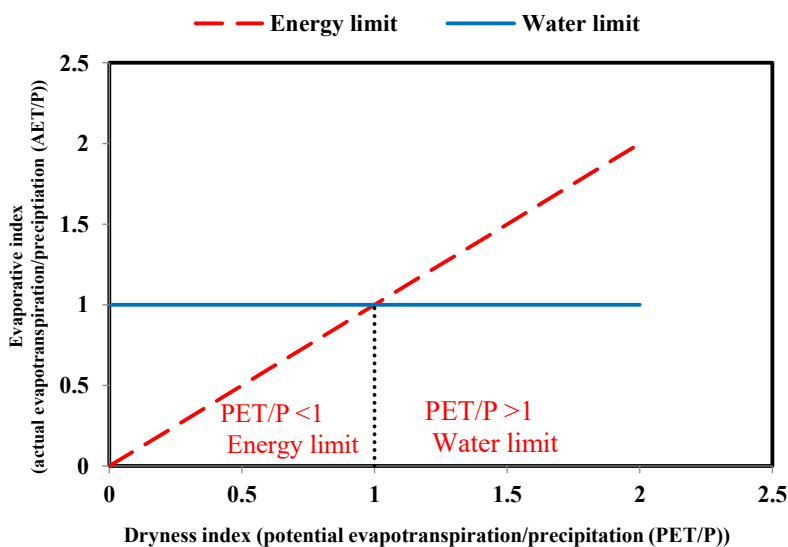
$$F(\phi) = \left[\phi \cdot \tanh\left(\frac{1}{\phi}\right) (1 - e^{\phi}) \right]^{1/2} \quad (۵)$$

در حالت کلی، معادله‌ی بودیکو به شکل رابطه‌ی ۶ بیان می‌شود (بودیکو ۱۹۷۴).

$$AET/P = \left[\phi \cdot \tanh\left(\frac{1}{\phi}\right) (1 - \exp(-\phi)) \right]^{\alpha}$$

$$\alpha = 0.5, \phi = PET/P$$

منحنی بودیکو، یک رابطه‌ی غیرخطی است که با محدودیت‌های فیزیکی تقاضای آب جوی ($PET > ET$) و عرضه ($P > ET$) محدود می‌شود. شاخص خشکی در منحنی بودیکو تعادل بلندمدت آب را نشان می‌دهد (بودیکو ۱۹۷۴). از رویکرد بودیکو به دلیل سادگی در پژوهش‌های پرشماری در زمینه‌ی آب‌شناسی و بررسی بیلان آب در مناطق مختلف دنیا استفاده شده است (فتحی و همکاران ۲۰۱۹). در این پژوهش نیز



شکل ۲- منحنی بودیکو و محدودیت آب و انرژی.

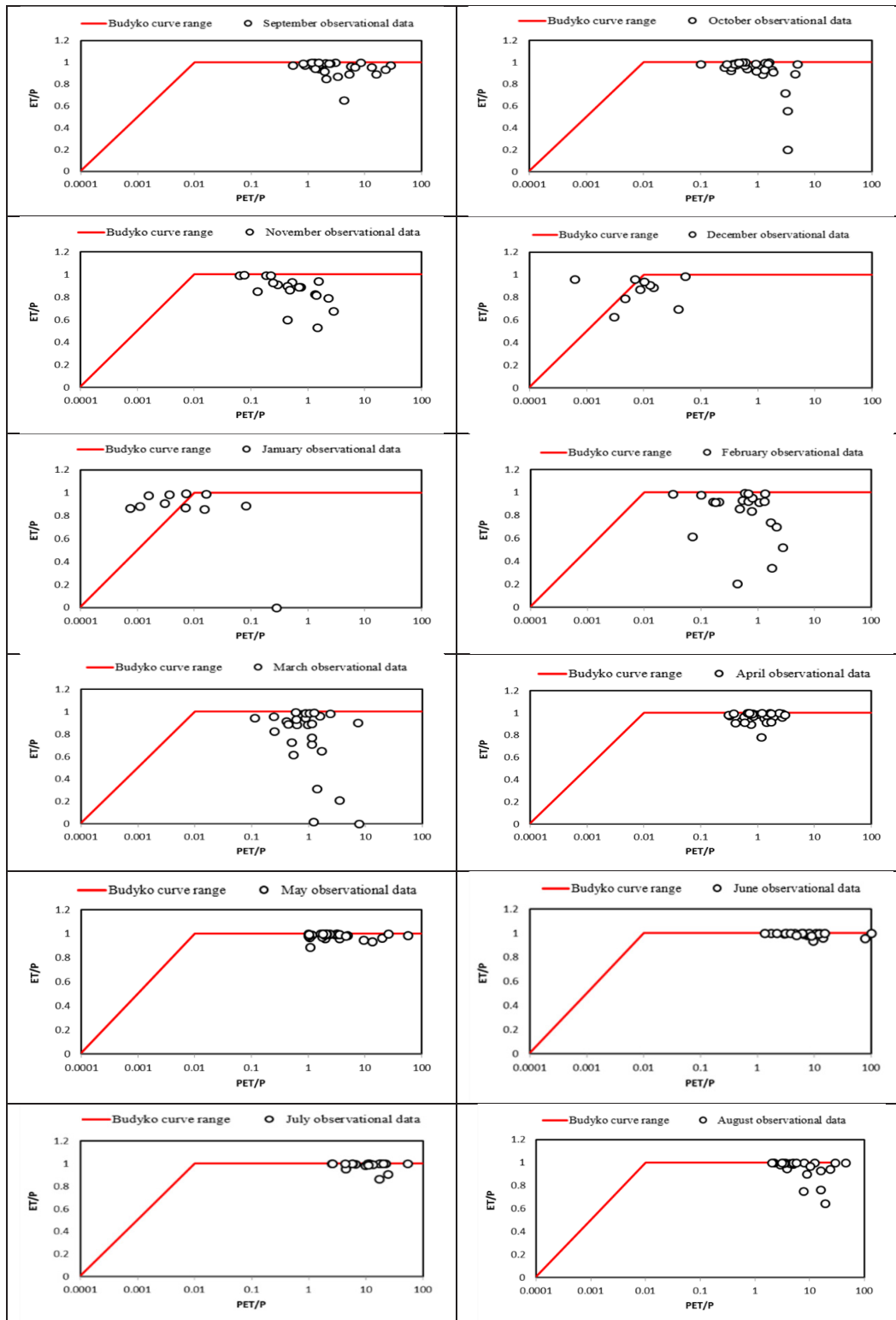
Figure 2- Budyko curve and water and energy limit.

رابطه‌های بیلان آب و انرژی متعادل در مقیاس ماهانه برپایه‌ی نتایج رابطه‌های بیلان انرژی و آب متعادل در مقیاس ماهانه، منحنی بودیکو نشان داد که شرایط مرجع برای دوره‌ی زمانی قبل از تغییرات اقلیمی بود که در عملکرد آب تشخیص داده شد. توزیع داده‌ها در منحنی بودیکو در سال‌های مطالعه‌شده نشان داد که اندازه‌ی مصرف آب در بوم‌نظام آبخیز نیر از محدوده‌ی پیش‌بینی شده بر اساس منحنی بودیکو، به انرژی و تعادل آب، دچار انحراف شده است (شکل ۳). بر اساس نتایج به دست آمده و با توجه به شکل ۳، محدودیت آب در مهرماه برخی از سال‌های بررسی شده، مشاهده شد. همچنین، در ماه‌های بهمن و دی هیچ‌گونه محدودیت آب و انرژی در این سال‌ها مشاهده نشد. در بیش‌تر ماه‌های سال $PET/P < 1$ بود و جهت منحنی به‌سوی خشکی و گرما بود. این حالت منعکس‌کننده‌ی تغییرات شرایط آب و هوایی (دما و بارندگی) بود. در منطقه‌ی مطالعه‌شده نتایج نشان داد که تبخیر-تعرق بیش‌تر از ذخیره‌ی آب بود. همچنین، ممکن است ساختار بوم‌نظام (ژرفای ریشه‌زایی، سطح برگ) و فرآیندهایی مانند سازگاری با کمبود آب، جریان کم‌تری در ماه‌های مرطوب و جریان بیش‌تری در ماه‌های خشک، نسبت به موازات موجود در انرژی و آب ایجاد کرده باشد.

در این پژوهش، ابتدا رابطه‌ی میان متغیرهای اقلیمی و جریان رود بر اساس رویکرد بودیکو بررسی شد. در شرایطی که توضیح رفتار جریان فقط با آب و هوا امکان‌پذیر نیست، از دیگر فرآیندهای آب‌شناختی و اثرات مختل‌کننده‌ی انسانی و طبیعی گذشته و حال بر بوم‌نظام، نیز استفاده می‌شوند (جانس و همکاران ۲۰۱۲). منحنی بودیکو، با فرض ناچیز بودن تغییرات بلندمدت ذخیره‌ی آب در آبخیز، بیلان آب را به‌شکل تابعی از اندازه‌ی آب و انرژی بیان می‌کند (لی و همکاران ۲۰۱۹). برای کاهش منحنی بودیکو سه دلیل می‌توان در نظر گرفت. دلیل اول، نمایش ناکافی P و T، دلیل دوم، نمایش نامناسب Q و ET و دلیل سوم نابودی طبیعی زمین‌ها و یا تغییر کاربری زمین‌ها باشد (جانس و همکاران ۲۰۱۲).

نتایج

در این پژوهش، بیلان آب آبخیز نیر با استفاده از داده‌های بارش، تبخیر-تعرق بالقوه، تبخیر-تعرق واقعی و منحنی بودیکو در مقیاس‌های زمانی (سالانه، فصلی و ماهانه) محاسبه و تحلیل شد. تغییرات منحنی بودیکو در مقیاس ماهانه در شکل ۳ نشان داده شده است.

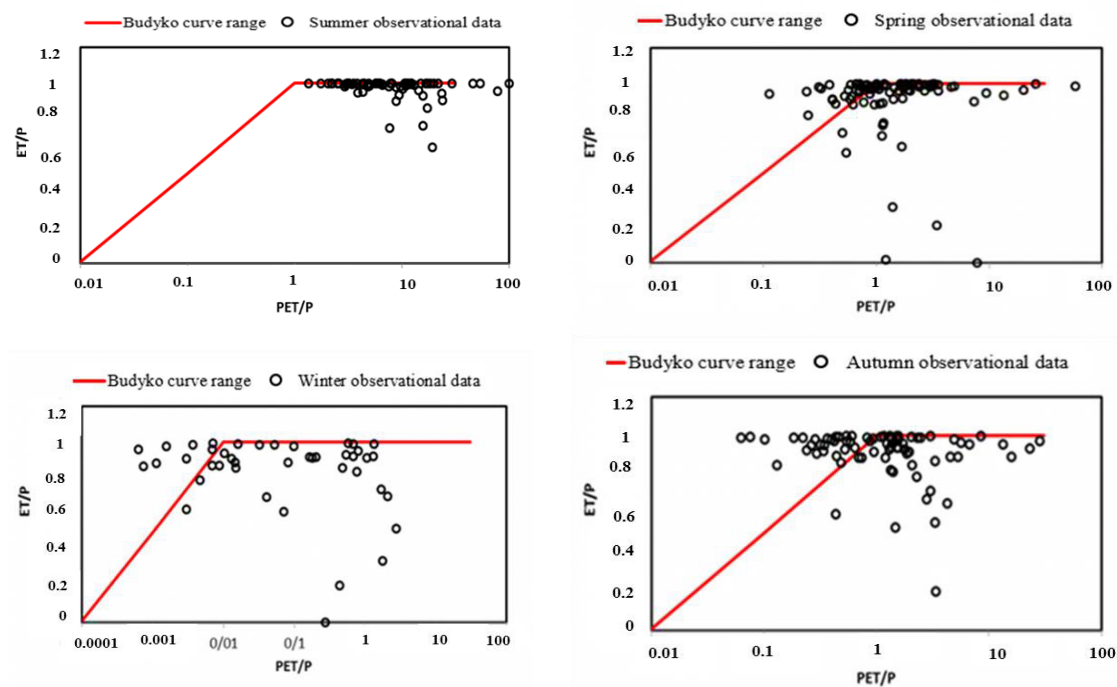


شکل ۳- منحنی بودیکو در ماه‌های مختلف سال در دوره‌ی آماری (۹۳-۱۳۶۰) در آبخیز نیر، اردبیل.

Figure 3- Budyko curve in different months of the year during the statistical period (1981-2014) in the Nir watershed, Ardabil.

محدودیت آب در سال‌های ۶۸، ۸۰، ۸۱، ۸۳، ۸۴، ۸۵ و ۸۸ به‌ترتیب ۲/۷۸، ۱/۷۰، ۱/۰۶، ۱/۷۸، ۲/۱۱ و ۱/۳۴ بود. در سال‌های مختلفی در فصل پاییز محدودیت آب مشاهده شد. بارش در این سال‌ها رخ داد اما، تبخیر-تعرق بیش از بارش بود. این موضوع می‌تواند، بیانگر آن باشد که پوشش گیاهی در فصل پاییز کاهش یافت. ویژگی‌های آمار توصیفی سنج‌ها در فصل‌های بررسی شده در جدول ۱ ارائه شده است.

رابطه‌های بیلان آب و انرژی متعادل در مقیاس فصلی توزیع اندازه‌های بیلان آب و انرژی متعادل در فصول مختلف سال در شکل ۴ نشان داده شده است. بر اساس نتایج به‌دست آمده و برپایه‌ی شکل ۴، محدودیت آب در فصل تابستان به دلیل نبود بارش در تمام سال‌های بررسی شده مشاهده شد. در این فصل میانگین و انحراف معیار داده‌ها $10/59 \pm 15/59$ بود. همچنین، نتایج نشان داد که در هیچ یک از فصل‌های سال محدودیت انرژی وجود نداشت. نتایج فصل زمستان نشان داد که



شکل ۴- منحنی بودیکو در فصل‌های مختلف سال در دوره‌ی آماری (۹۳-۱۳۶۰) در آبخیز نیر، اردبیل.

Figure 4- Budyko curve in different seasons during the statistical period (1981-2014) in the Nir watershed, Ardabil.

همچنین بیشترین اندازه‌ی تبخیر-تعرق به میانگین شاخص بارندگی سالانه ET/P در تمام فصل‌ها به جز فصل زمستان برابر با ۱ بود. اندازه‌ی سنج‌های PET/P و ET/P در فصل‌های بررسی شده در آبخیز نیر در جدول ۲ ارائه شده است.

بیشترین اندازه‌ی PET (میلی‌متر) در فصل پاییز و کم‌ترین اندازه‌ی آن در فصل زمستان بود (جدول ۱). بیشترین اندازه‌ی تبخیر-تعرق بالقوه به میانگین شاخص بارندگی سالانه (PET/P) که برای توصیف تعادل آب و انرژی استفاده می‌شود، در فصل بهار بود.

جدول ۱- ویژگی‌های آمار توصیفی سنجه‌ها در فصل‌های بررسی شده.

Table 1- Descriptive statistics of metrics in the studied seasons.

Season	Statistics	Precipitation (mm)	PET (mm)	PET/P	ET/P
Spring	Mean ± SD	49.82 ± 38.14	2.27 ± 0.83	2.74 ± 6.80	0.89 ± 0.21
	Min - Max	1.50 - 254.00	0.00 - 3.69	0.00 - 15.59	0.00 - 1.00
Summer	Mean ± SD	14.13 ± 11.59	2.88 ± 0.66	10.59 ± 0.83	0.98 ± 0.06
	Min - Max	0.1 - 58.00	0.00 - 3.93	0.00 - 99.77	0.64 - 1.00
Autumn	Mean ± SD	33.23 ± 23.07	1.17 ± 0.80	2.07 ± 4.27	0.91 ± 0.12
	Min - Max	0.00 - 96.00	0.00 - 4.24	0.00 - 28.41	0.20 - 1.00
Winter	Mean ± SD	25.65 ± 14.87	0.33 ± 0.37	0.21 ± 0.51	0.78 ± 0.23
	Min - Max	0.5 - 86.00	0.00 - 1.48	0.00 - 2.78	0.00 - 0.99

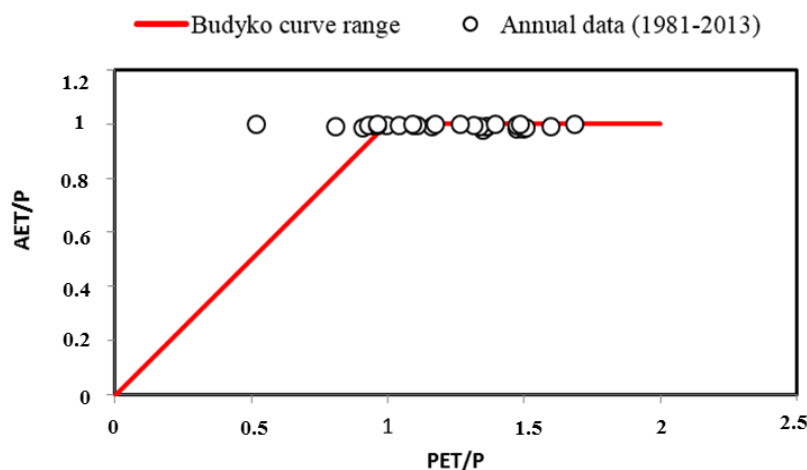
جدول ۲- اندازه‌های سنجه‌های PET/P و ET/P در فصل‌های بررسی شده.

Table 2- Values of PET/P and ET/P indices in the studied seasons.

Year	Spring		Summer		Autumn		Winter	
	PET/P	ET/P	PET/P	ET/P	PET/P	ET/P	PET/P	ET/P
1981	0.81	0.96	3.87	0.99	0.78	0.96	0.00	0.95
1982	1.02	0.60	10.05	0.91	2.30	0.53	0.00	0.47
1983	1.19	0.86	8.57	0.97	0.18	0.94	0.00	0.40
1984	1.82	0.73	7.35	0.98	3.13	0.78	0.15	0.07
1985	1.79	0.88	0.00	0.00	1.32	0.92	0.00	0.82
1986	1.02	0.96	9.08	0.59	1.72	0.76	0.00	0.70
1987	0.50	0.78	0.00	0.99	0.00	0.84	0.00	0.21
1988	0.00	0.65	0.00	1.00	0.00	0.96	0.00	0.62
1989	0.00	0.77	34.10	1.00	0.92	0.86	0.93	0.79
1990	5.54	0.87	21.89	1.00	0.59	0.88	2.78	0.70
1991	1.12	0.84	0.00	0.00	1.71	0.91	0.05	0.78
1992	0.65	0.84	6.14	0.99	0.99	0.93	0.00	0.55
1993	3.13	0.65	6.73	0.99	2.08	0.80	0.02	0.71
1994	1.32	0.96	3.00	1.00	1.99	0.91	0.00	0.79
1995	2.40	0.70	2.69	1.00	0.97	0.91	0.26	0.61
1996	0.55	0.90	9.98	0.88	0.52	0.83	0.16	0.88
1997	1.87	0.98	1.74	1.00	0.85	0.92	0.00	0.81
1999	7.24	0.97	4.57	1.00	2.39	0.89	0.28	0.61
2000	1.74	0.95	16.98	1.00	1.33	0.95	0.07	0.92
2001	2.30	0.99	11.37	1.00	0.54	0.95	1.70	0.78
2002	3.52	0.97	4.00	1.00	0.74	0.95	1.06	0.91
2003	0.92	0.92	10.87	1.00	3.33	1.00	1.30	0.90
2004	1.19	0.97	10.97	0.88	9.86	0.96	1.78	0.88
2005	1.49	0.97	7.25	0.96	0.64	0.95	2.11	0.73
2006	2.08	0.98	45.17	0.99	1.22	0.99	0.70	0.85
2007	2.29	0.95	18.77	1.00	0.59	0.96	0.03	0.99
2008	4.51	0.97	4.62	1.00	6.08	0.98	0.23	0.91
2009	1.55	1.00	8.99	1.00	1.43	0.97	0.48	0.95
2010	1.13	0.99	9.86	1.00	0.75	0.99	0.22	0.99
2011	1.28	0.99	9.60	1.00	9.14	0.87	0.01	0.33
2012	1.99	0.96	8.06	0.96	0.81	0.97	0.00	0.95
2013	2.38	0.99	14.46	0.97	2.82	0.98	0.27	0.97
2014	2.52	0.99	14.83	0.94	5/50	0.96	0.23	0.78

در شکل ۴ نشان داده شده است. تغییرات اندازه‌های AET در محدوده‌ی متفاوتی از انرژی و تعادل آب بود و این به دلیل تأثیر اهمیت فرآیندهای بوم‌نظام در جریان است (شکل ۴). بیش‌تر سال‌های مطالعه شده روی منحنی بودیکو بودند. در این محدوده اندازه‌ی مصرف آب مشاهده شده (AET/P) برابر با پیش‌بینی مصرف آب (PET/P) بود. برپایه‌ی شکل ۴ در دوره‌ی ۳۳ سال بررسی شده، تنها دو سال (۶۰ و ۷۳) محدودیت انرژی داشتند. در سال‌های بررسی شده بیشترین، میانگین و حداقل ET به ترتیب ۸۷۶/۵۵، ۴۳۱/۸۵ و ۲۷۷/۸۸ میلی‌متر به دست آمد. هم‌چنین بیشترین، میانگین و حداقل نسبت PET/P در دوره‌ی ۳۳ سال بررسی شده به ترتیب ۰/۰۷، ۰/۰۵ و ۰/۰۲ میلی‌متر بود.

رابطه‌های بیلان آب و انرژی متعادل در مقیاس سالانه توزیع اندازه‌های بیلان آب و انرژی سالانه در شکل ۵ نشان داده شده است. اندازه‌ی P، T، Q بر اساس داده‌های مشاهده‌ای برای محاسبه PET و AET استفاده شدند (شکل ۵). PET سالانه بر اساس مجموعه‌ای از اندازه‌های ماهانه محاسبه شد. سپس، اندازه‌های محاسبه شده روی منحنی بودیکو رسم شد. رابطه‌ی میان اندازه‌ی PET و AET در شکل ۵ نشان داده شده است. هنگامی که اندازه‌ی سالانه T، P و Q روی منحنی بودیکو رسم شد، تغییر AET نسبت به PET در میان سال‌های بررسی شده متفاوت بود. تغییرات در اندازه‌های AET/P در سال‌های (۶۰، ۶۲، ۶۸، ۷۳، ۸۶ و ۸۹) کم‌تر بود. مقایسه‌ی AET و PET بلندمدت با منحنی بودیکو در آبخیز مطالعه شده



شکل ۵- منحنی بودیکو سالانه در دوره‌ی آماری (۹۳-۱۳۶۰) در آبخیز نیر، اردبیل.

Figure 5- Annual Budyko curve during the statistical period (1981-2014) in the Neir Watershed, Ardabil.

اندازه‌گیری می‌شود. اطلاعات اقلیمی و آب‌شناسی جریان می‌تواند روی فرآیندها و واکنش آبخیز از دیدگاه تولید رواناب و رسوب تأثیرگذار باشد. بر اساس نتایج این پژوهش، بیش‌تر سال‌های مطالعه شده در محدوده بالای منحنی بودیکو بودند. در این محدوده اندازه‌ی مصرف آب مشاهده شده (AET/P) برابر با پیش‌بینی مصرف آب (PET/P) بود. جانس و همکاران (۲۰۱۲) دریافتند که اگر تقسیم‌بندی میان ET و Q از منحنی بودیکو منحرف شود، می‌توان آن را به تغییرات اقلیمی انسان‌شناختی نسبت داد. یافته‌های این پژوهش با نتایج جانس و همکاران (۲۰۱۲) هم‌راستا است. بر اساس نتایج این پژوهش تغییرات AET/P در سال‌های ۶۰، ۶۲، ۶۸، ۷۳، ۸۶ و ۸۹ کم‌تر بود. فو و

بحث و نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف تعیین تغییرات بیلان آب و انرژی در مقیاس‌های گوناگون زمانی با استفاده از منحنی بودیکو در آبخیز نیر در استان اردبیل انجام شد. دانستن برآورد اولیه از اندازه‌ی تبخیر-تعرق در آبخیزها، افزون بر پیشنهاد راهکارهای مدیریتی در شرایط تغییر اقلیم، می‌تواند به بهبود عملکرد مدل‌های توزیعی، آب‌شناختی نیز کمک کند. ترکیب مدل‌های ساده‌ای همچون منحنی‌های بودیکو با مدل‌های توزیعی راهکار مفیدی برای افزایش دقت برآورد متغیرهای آب‌شناختی است. سنجه‌های رویکرد بودیکو در تحلیل بیلان آبی، بستگی به فعالیت‌های انسانی و تغییرات مؤلفه‌های آب و هوایی دارد که با ثبت آمار هواشناسی و تغییرات جریان رودها

در آبخیز مطالعه‌شده از اندازه‌ی بارش بیش‌تر بود. نتایج این پژوهش می‌تواند برای مدیریت منابع آب با در نظر گرفتن محدودیت‌های تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسانی به‌کار گرفته شود.

برآورد میانگین جریان و تبخیر-تعرق در مقیاس‌های مکانی کوچک‌تر مانند زیرآبخیزها امکان ارزیابی منابع آب در دسترس در این مکان‌ها را فراهم می‌آورد. این برآوردها را می‌توان با روش‌های آماری و استفاده از ویژگی‌های گیتاشناسی آبخیزها انجام داد. از آنجایی که تغییر در کاربری زمین‌ها می‌تواند به تغییر در واکنش آب‌شناختی و در نتیجه تغییر آب‌دهی آبخیز منجر شود، ارزیابی بیلان آب با رویکرد مزبور در سناریوهای مختلف تغییر کاربری زمین‌ها می‌تواند مفید باشد. هر دو عامل بارش و تبخیر-تعرق بر اندازه‌ی آب‌دهی جریان تأثیر گذارند ولی تأثیر آن‌ها هم‌راستا نیست. از این رو، ارزیابی تأثیر تغییر دو مؤلفه‌ی مزبور می‌تواند در قالب سناریوهای گوناگونی مبتنی بر تغییرات افزایشی و کاهش‌ی اقلیم در نظر گرفته شود و در ارزیابی تغییرات بیلان آب و در نتیجه مدیریت منابع آب استفاده شود.

ونگ (۲۰۱۹) تغییرات اندازه‌های PET/P و AET/P نسبت به منحنی بودیکو بررسی کردند و نتیجه گرفتند که بوم‌نظام‌ها قادر به تنظیم AET بودند. این یافته با نتایج این پژوهش هم‌خوانی دارد. در آبخیز نیر، نتایج نشان داد که محدودیت آب با ویژگی‌های سطح زمین و فعالیت‌های انسانی تغییر کرد. هم‌چنین، با افزایش دما و کاهش بارش، اندازه‌ی تبخیر-تعرق واقعی سالانه‌ی آبخیز افزایش یافت. مصطفی‌زاده و همکاران (۲۰۲۲) با کاربرد شاخص هرست در تعیین حافظه‌ی طولانی‌مدت گروه‌های زمانی بارش و آب‌دهی ایستگاه‌های برگزیده‌ی استان اردبیل، نتیجه گرفتند که تغییرات شاخص هرست در اکثر مناطق تغییرات شاخص هرست در حد پایداری ضعیف بودند و بخش‌هایی از شمال‌شرقی و مرکزی این مناطق در حد پایداری نسبتاً قوی بودند. افزایش تبخیر-تعرق و کاهش بارش سبب کاهش رواناب آبخیز شد. کاهش رواناب و کاهش منابع آب پیامدهای اجتماعی، اقتصادی و زیست محیطی فراوانی دارد و نیازمند پیشنهاد راهکارهای مدیریتی و سازگار با اقلیم مناسب برای استفاده بهینه از منابع آب موجود است. بر اساس نتایج این پژوهش، اندازه‌ی تبخیر-تعرق

فهرست منابع

- Budyko, M. (1999). Climate catastrophes. *Global and Planetary Change*, 20(4), 281-288. [https://doi.org/10.1016/S0921-8181\(98\)00062-9](https://doi.org/10.1016/S0921-8181(98)00062-9)
- Emamifar S, Davari K, Ansari H, Ghahraman B, Hosseini SM, Naseri M. 2018. Evaluation of DWB model and its correction for estimation of water balance components in Annual - watershed scale (Case study: Neishaboor and Rokh watershed). *Iran-Water Resources Reserch*, 14(2):94-104. (In Persian).
- Esmali A, Ahmadi H, Tahmoures M. 2014. Quantity assessment of water erosion intensity using regional model of erosion and sediment yield (Case study: Nir watershed, Ardebil). *Journal of Range and Watershed Management*, 67(3):407-417. (In Persian). <https://doi.org/10.22059/jrwm.2014.52830>
- Fang K, Shen Ch, Fisher JB, Niu J. 2016. Improving Budyko curve-based estimates of long-term water partitioning using hydrologic signatures from GRACE. *Water Resources Research*, 52(7):1-18. <https://doi.org/10.1002/2016WR018748>
- Fathi MM, Awadallah AG, Abdelbaki AM, Haggag M. 2019. A new Budyko framework extension using time series SARI-MAX model. *Journal of Hydrology*, 570:827-838. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.01.037>
- Fu J, Wang W. 2019. On the lower bound of Budyko curve: The influence of precipitation seasonality. *Journal of Hydrology*, 570:292-303. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.12.062>
- Fu, BP. 1981. On the calculation of the evaporation from land surface. *Chin. Journal of the Atmospheric Sciences*, 5(1):23-31.
- Gerrits AMJ, Savenije HHG, Veling EJM, Pfister L. 2009. Analytical derivation of the Budyko curve based on rainfall characteristics and a simple evaporation model. *Water Resources Research*, 45(4):1-15. <https://doi.org/10.1029/2008WR007308>
- Gong DY, Shi PJ, Wang JA. 2004. Daily precipitation changes in the semi arid region over northern China. *Journal of Arid Environments*, 59(4):771-784. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2004.02.006>
- Greve P, Gudmundsson L, Orlowsky B, Seneviratne SI. 2016. A two-parameter Budyko function to represent conditions under which evapotranspiration exceeds precipitation. *Hydrological Earth System Sciences*, 20(6):2195-2205. <https://doi.org/10.5194/hess-20-2195-2016>
- Jones J, Creed IF, Hatcher K, Warren R, Adams M, Benson M, Boose M, Brown M, Campbe J, Williams MW. 2012. Ecosystem Processes and Human Influences Regulate Streamflow Response to Climate Change at Long-Term Ecological Research Sites. *Biological Sciences*, 62(4):390-404. <https://doi.org/10.1525/bio.2012.62.4.10>
- Lee TY, Chiu CC, Chen CJ, Lin CY, Shiah FK. 2023. Assessing future availability of water resources in Taiwan based on the Budyko framework. *Ecological Indicators*, 146:109808. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109808>
- Liu J, Chen J, Xu J, Lin Y, Yuan Z, Zhou M. 2019. Attribution of RunoVariation in the Headwaters of the Yangtze River Based on the Budyko Hypothesis. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(14):2506. <https://doi.org/10.3390/ijerph16142506>
- Mianabadi A, Alizadeh A, Sanaeinejad SH, Ghahraman B, Davary K. 2016. Prediction of Annual Evaporation Change in Dry Regions Using the Budyko-type framework (Case Study of Neishaboor-RokhWatershed). *Journal of Irrigation and Drainage*,

- 10(3):398-411. (In Persian)
- Mianabadi A, Gerrits MC, Shirazi P, Ghahra-man B, Alizadeh A. 2019. 1 A global Budyko model to partition evaporation into interception and transpiration. *Journal Hydrological Earth System Sciences*, 23(12):4983–5000. <https://doi.org/10.5194/hess-23-4983-2019>
- Mostafazadeh R, Moradzadeh V, Alaei N, Hazbavi Z. 2022. Determining long-term memory using Hurst Index for precipitation and discharge time series of selected stations in Ardabil province. *Water and Soil Resources Conservation*, 11(2):113-131. (In Persian) <https://doi.org/10.30495/wsrecj.2021.19217>
- Mostafazadeh R, Nasiri Khiavi A, Ghabelnezam E. (2023). Temporal changes and flow pattern analysis using Colwell indices in mountainous rivers. *Environment, Development and Sustainability*. pp. 1-18. <https://doi.org/10.1007/s10668-023-03033-2>
- Nasiri Khiavi A, Faraji A, Mostafazadeh R. 2020. Streamflow Response to Rainfall Changes Using the Climate Elasticity Index in Some Watersheds of Ardabil Province. *Hydrogeomorphology*, 6(21):1-22. (In Persian). <https://dorl.net/dor/20.1001.1.238332.54.1398.6.21.1.6>
- Ning T, Zhou Sh, Chang F, Shen H, Li Z, Liu W. 2019. Interaction of vegetation, climate and topography on evapotranspiration modelling at different time scales within the Budyko framework. *Agricultural and Forest Meteorology*, 275:59–68. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.05.001>
- Sankarasubramanian A, Wang D, Archfield S, Reitz M, Vogel RM, Mazrooei A, Mukhopadhyay S. 2022. HESS Opinions: Beyond the long-term water balance: evolving Budyko's supply–demand framework for the Anthropocene towards a global synthesis of land-surface fluxes under natural and human-altered watersheds. *Hydrology and Earth System Sciences*, 24(4):1975-1984. <https://doi.org/10.5194/hess-24-1975-2020>
- Sheikh V, Naderi M, Sadoddin A, Asadi Nalivan O, Keramatzadeh A, Abedi Tourani M, Nazari A. Quantifying the contributions of climate change and human interventions on streamflow alteration in the Hableroud Rbasin using the hydrological sensitivity analysis approach based on the Budyko hypothesis. *Water and Soil Management and Modeling*, 3(4), 241-259. (In Persian). <https://doi.org/10.22098/mmws.2023.12114.1205>
- Talebi Khiavi H, Mostafazadeh R. 2021. Land use change dynamics assessment in the Khiavchai region, the hillside of Sabalan mountainous area. *Arabian Journal of Geosciences*, 14:1-15. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-08690-z>
- Trancoso R, Larsen JR, McAlpine C, McVicar TR, Phinn S. 2016. Linking the Budyko framework and the Dunne diagram. *Journal of Hydrology*, 535:581–597. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.02.017>
- Wang D, Tang Y. 2014. A one-parameter Budyko model for water balance captures emergent behavior in darwinian hydrologic models. *Geophys. Res. Lett*, 41(13):4569–4577. <https://doi.org/10.1002/2014GL060509>
- Wang W, Fu J. 2018. Global assessment of predictability of water availability: a bivariate probabilistic Budyko analysis. *Journal of Hydrology*, 557:643–650. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.12.068>
- Zhang X, Dong Q, Costa V, Wang X. 2019. A hierarchical Bayesian model for decomposing the impacts of human activities and climate change on water resources in China. *Science of the Total Environment*, 665:836-847. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.189>
- Zheng H, Zhang L, Zhu R, Liu C, Sato Y, Fukushima Y. 2009. Responses of streamflow to climate and land surface change in the headwaters of the Yellow River Basin. *Water Resources Research*, 45(7):1–9. <https://doi.org/10.1029/2007WR006665>



Determining Changes in Water and Energy Balance in Different Time Scales Using Budyko Curve in the Nir Watershed, Ardabil

Raof Mostafazadeh¹, Nazila Alaei², Fatemeh Kateb³

1- Associate Professor, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Member of Water Management Research Center, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

2- Ph.D. Student, Watershed Management Science and Engineering, Faculty of Natural Resources, Urmia University, Urmia, Iran

3- Former M.Sc. Student, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

Extended Abstract

Introduction and Goal

In hydrological and water resources studies, the understanding of water balance components and changes holds great significance. Climate changes and human activities affect runoff changes, water resources management and sustainable development of society. In this regard, the current research was conducted with the aim of determining and comparing water balance changes using Budyko curve in Nir watershed, Ardabil province.

Materials and Methods

The Budyko curve was calculated for the Nir watershed in monthly, seasonal and annual time scales. In this study, the data of the rain gauge and evapotranspiration station of the watershed were also used in a statistical period of 33-years to calculate the average precipitation and evapotranspiration potential in the watershed. In the Budyko curve, the non-linear relationship that is limited by the physical limits of atmospheric water demand ($PET > ET$) and supply ($P > ET$) and the aridity index in the Budyko curve show the long-term water balance.

Results and Discussion

The results showed that, the trend of flow changes is directly related to the trend of weather components in annual time scale. Meanwhile, contrary to expectation, only in some seasons does the flow change process follow the change in climatic components. In addition, the Budyko curve analysis indicated that the amount

Article Type: Research Article

*Corresponding Author E-mail: raofmostafazadeh@uma.ac.ir

Citation: Mostafazadeh, R., Alaei, N., Kateb, F. 2024. Determining Changes in Water and Energy Balance in Different Time Scales Using Budyko Curve in the Nir Watershed, Ardabil. *Watershed Management Research*. 37(2): 39-54.

DOI: 10.22092/wmrj.2023.362093.1538

Received: 26 April 2023, **Received in revised form:** 16 June 2023, **Accepted:** 21 September 2023

Published online: 21 June 2024

Watershed Management Research, VOL. 37, No.2, Ser. No: 143, Summer 2024, pp. 39-54.

Publisher: Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center

©Author(s)



of water consumption in the studied watershed regularly deviated from its predicted dependence on energy and water balance. The maximum, average and minimum ET for the studied years were obtained as 876.55, 431.85 and 277.88, respectively. Also, the maximum, average and minimum ratio of PET/P was 0.07, 0.05 and 0.02 respectively. In most of the years studied, the observational data aligned with the water limit range on the Budyko curve, indicating that the observed water consumption (AET/P) matched the predicted water consumption (PET/P). According to the results, the changes in AET/P are less in the years (1981, 1983, 1989, 1994, and 2010). Based on the changes in the values of PET/P and AET/P in the Budyko curve, the watershed ability to regulate AET can be considerable.

Conclusions and Suggestions

The results of this study indicated that with increased temperature and decreased precipitation, the annual actual evapotranspiration of the watershed increased, leading to a reduction in runoff. The results can be the basis for providing management solutions and adapting to the climate change in order to optimally use the available water resources. In general, it can be said that the amount of potential evaporation in the studied watershed is more than the amount of precipitation. The study's findings can provide a basis for managing water resources under the limitations of climate change and human abstractions.

Keywords: Potential evapo-transpiration, river flow discharge, water resources management, water balance, climatic variables