محاسبه‌ی تعداد توربین‌های بادی مورد نیاز برای تأمین آب آشامیدنی احشام عشایری در استان ایلام

مهدی خانی*[۱]، امیر عزیزپناه[۲]

۱- استادیار گروه مهندسی مکانیزاسیون کشاورزی دانشگاه گیلان

۲- استادیار گروه مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی دانشگاه ایلام

* ایمیل نویسنده مسئول: mahdikhani@guilan.ac.ir

چکیده

در مناطق دور افتاده، انتقال توان بسیار پرهزینه است و بهتر است از روش‌هایی استفاده شود که بتوان از منابع موجود در منطقه، انرژی مورد نیاز منطقه را تأمین کرد. در استان ایلام، عشایر در بخش‌هایی به صورت موقتی اتراق می‌کنند و معمولاً آب شرب مورد نیاز انسان‌ها و دام‌ها با استفاده از تانکر در دسترس آن‌ها قرار می‌گیرد. روشی که اخیراً به کار رفته، استفاده از تلمبه‌های بادی برای تأمین آب است. در این پژوهش از یک توبین بادی پرپره به همراه یک استخر ذخیره‌ی آب برای تأمین آب عشایر استفاده شد. ظرفیت استخر و تعداد پمپ‌ها به عنوان متغیرهایی در نظر گرفته شده‌اند که با تغییر آن‌ها، میزان تأمین آب از طریق انرژی بادی و وابستگی به روش‌های دیگر تأمین آب، تغییر می‌یابد. نتایج این مطالعه نشان داد که با افزایش حجم استخر، مقدار کمبود آب و همچنین تعداد روزهای کمبود آب در یک بازه‌ی زمانی معین کاهش می‌یابد. با افزایش بیش‌تر حجم استخر، کمبود آب صفر شده و بنابراین در تمامی روزها آب کافی برای مصرف واحد عشایری وجود دارد. همچنین در یک حجم مخزن مشخص، با افزایش تعداد پمپ‌ها، میزان کمبود آب کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: توربین بادی، استخر، کمبود آب، ذخیره انرژی، دبی.

مقدمه

در گذشته، سامانه‌های توان مورد استفاده، در شکل ساده‌ی خود مورد استفاده قرار می‌گرفته‌اند. یعنی انتقال توان از طریق سامانه‌های تولید توان متمرکز بزرگ به نقاط مصرف دوردست که اغلب بر اساس سوزاندن سوخت‌های فسیلی بود (Rodrigues *et al*, 2014). در مناطق دور افتاده، انتقال انرژی برق بسیار پرهزینه است و بهتر است از روش‌هایی استفاده شود که بتوان از منابع موجود در منطقه انرژی مورد نیاز در منطقه را تأمین کرد. در استان ایلام، عشایر در بخش‌هایی به صورت موقتی اتراق می‌کنند و معمولاً آب شرب مورد نیاز انسان‌ها و دام‌ها با استفاده از تانکر به محل مصرف انتقال می‌یابد. روشی که اخیراً به کار می‌رود، استفاده از تلمبه‌های بادی برای تأمین آب است.

در گذشته معمول‌ترین کاربرد پمپ‌های بادی، آب دادن به دام یا تأمین آب مناطق مسکونی کوچک انسانی بود. کاربردهایی مانند آبیاری به ندرت عملی هستند هر چند به طور مرتب در منابع ظاهر می‌شوند (Fraenkel *et al*, 1996). به عنوان نمونه در کوبا، با برآورد نیاز آبی گلخانه، سامانه‌ی بهینه‌ی تأمین آب از طریق پمپ‌های بادی تعیین گردید (Peillón *et al*, 2013). در پژوهشی دیگر روشی برای انتخاب بهینه‌ی پمپ و توربین بادی برای شرایط معین پمپاژ آب ارائه شد (Bragg and Schmidt, 1979).

در پژوهشی که در هند انجام شد اندازه‌ی سامانه‌ی پمپاژ آب بادی با توجه به سطوح ریسک مختلف عدم فرآهمی آب بهینه‌سازی شد. در این مطالعه، سرعت باد و به تبع آن دبی سامانه‌ی آبیاری به عنوان کمیت‌های تصادفی در نظر گرفته شدند. با در نظر گرفتن احتمال عدم فرآهمی آب پمپاژی به عنوان ریسک، اندازه‌های مخزن که بتوانند نیازهای روزانه آب را تأمین کنند، محاسبه شد (Panda *et al*, 1987). در عربستان سعودی نیز امکان استفاده از توربین‌های بادی برای پمپاژ آب از نظر فنی و اقتصادی بررسی گردید (Rehman and Sahin., 2012).

یکی از مشکلات انرژی بادی، ماهیت موقتی آن است که باعث می‌شود در هر زمانی که نیاز است نتوان به مقدار لازم آن را در اختیار داشت. بنابراین بایستی در کنار تمام منابع انرژی که ماهیت موقتی دارند مانند باد و انرژی خورشیدی، از یک منبع انرژی کنترل‌پذیر و دائمی مانند موتور احتراقی و برق شبکه استفاده کرد. البته راه دیگر که می‌توان به تنهایی یا با ترکیب با روش اول استفاده کرد، ذخیره‌ی انرژی استحصال شده است. در حالتی که انرژی بادی مستقیماً برای پمپاژ آب استفاده شود می‌توان از یک منبع ذخیره‌ی آب استفاده کرد تا در زمانی که جریان باد زیاد است، آب به داخل مخزن پمپ شود و در هنگامی که باد کافی وجود ندارد، از آب ذخیره شده استفاده گردد. در شرایطی که انرژی بادی ابتدا به انرژی الکتریکی تبدیل شده و بعد با موتور الکتریکی، پمپاژ آب صورت می‌گیرد، به غیر از استفاده از مخازن ذخیره‌ی آب، می‌توان برای ذخیره‌ی انرژی الکتریکی از باتری نیز استفاده کرد. البته در این روش، ۵۱ درصد از انرژی در اجزاء الکتریکی (رکتیفایر، باتری، اینورتر و غیره) هدر می‌رود (Lara *et al*., 2011). این روش ذخیره‌ی انرژی در پمپاژ آب با استفاده از سلول‌های خورشیدی نیز کاربرد دارد. در مطالعه‌ای که در آن کارهای انجام شده در رابطه با کاربرد انرژی‌های تجدیدپذیر در سامانه‌های پمپاژ آب، بازنگری شده نیز اظهار شد که در سامانه‌ی پمپاژ آب به روش انرژی خورشیدی، مخزن ذخیره آب از باتری ذخیره‌ی انرژی کم‌هزینه‌تر است (Gopal *et al*, 2013). در سامانه‌های بادی پمپاژ آب آبیاری بهتر است ارتفاع مخزن ذخیره‌ی آب به اندازه‌ای باشد که جاذبه‌ی زمین، فشار مورد نیاز سامانه‌ی آبیاری را تأمین کند و به سامانه‌ی پمپاژ جداگانه نیاز نباشد (Suleimani and Rao, 2000).

در حالتی که از انرژی باد برای تأمین برق استفاده می‌شود از روش‌های دیگری نیز برای ذخیره‌ی انرژی استفاده می‌شود. در یک پژوهش، روشی برای ذخیره‌ی انرژی حاصل از باد به صورت هیدرولیکی پیشنهاد داده شد. در این روش با استفاده از انرژی باد، آب از یک منبع با ارتفاع پایین به یک منبع با ارتفاع بالا پمپ می‌شود و در هنگام نیاز، آب از منبع بالا به منبع پایین سرازیر می‌شود. در این میان با استفاده از توربین و ژرناتور، برق یک جزیره تأمین می‌شود (Chen *et al*, 2016). در پژوهشی دیگر، روش‌های مختلف ذخیره‌ی انرژی برای کاربردهای توان بادی مورد بررسی قرار گرفت (Díaz-González *et al*, 2012).

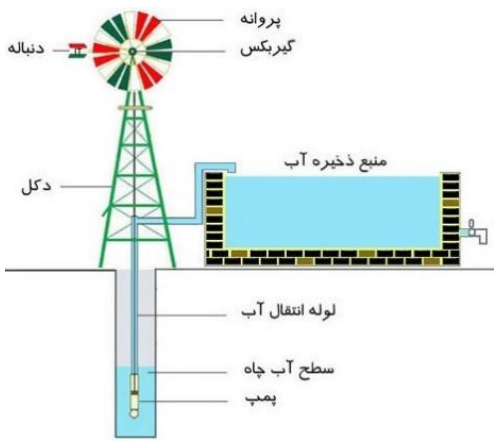
هدف این مطالعه، معرفی روش پمپاژ آب با استفاده از انرژی بادی برای تأمین آب عشایر است و در آن اندازه‌ی استخر و تعداد پمپ‌ها به عنوان متغیرهایی در نظر گرفته شده‌اند که با تغییر آن‌ها، میزان تأمین آب از طریق انرژی بادی و کاهش وابستگی به روش‌های دیگر تأمین آب، تغییر می‌یابد.

مواد و روش‌ها

در این مطالعه، روش پمپاژ مستقیم آب توسط توربین بادی برای تأمین آب مورد نیاز عشایر و احشام آن‌ها در هنگام اتراق در یک محل موقتی، به کار رفته است. ذخیره‌ی آب با استفاده از استخر انجام می‌شود و محل اتراق عشایر منطقه صالح‌آباد در استان ایلام می‌باشد. این منطقه از شمال به شهرستان ایلام، از شرق به شهرستان ملکشاهی، از غرب به مرز عراق و از جنوب به بخش مرکزی مهران محدود می‌شود. این بخش بین ۳۳ درجه و ۲۹ دقیقه عرض شمالی و ۴۶ درجه و ۱۱ دقیقه طول شرقی قرار دارد و ارتفاع آن از سطح دریا ۵۸۴ متر است.

با توجه به این که امکان انتقال آب با استفاده از تانکر وجود دارد، عدم کفایت باد برای تأمین آب مورد نیاز، یک هزینه تلقی می‌گردد. در حالتی که از توربین بادی برای آبیاری استفاده شود، به علت حجم بالای آب مورد نیاز، استفاده از تانکر منطقی به نظر نمی‌رسد و بهتر است از روش‌های دیگری مانند استفاده از موتور دیزل، کمبود آب مرتفع گردد وگرنه عدم فرآهمی آب به عنوان یک ریسک در نظر گرفته می‌شود.

توربین مورد استفاده از نوع پرپره و پمپ مورد استفاده نیز از نوع پیستونی می‌باشد که در شکل ۱ به صورت شماتیک نشان داده شده است.



شکل ۱: سامانه‌ی بادی مورد استفاده برای تأمین آب عشایر

برای محاسبه‌ی میزان آب پمپاژی توسط توربین مورد نظر، ابتدا آمار سرعت باد منطقه در طی چهار سال جمع‌آوری شد. این آمار به صورت سه مشاهده‌ی سرعت باد در هر روز بودند. سرعت باد در ساعت‌های، ۶:۳۰ صبح، ۱۲:۳۰ ظهر و ۱۸:۳۰ عصر اندازه‌گیری شده است. با توجه به این که فصل اسکان عشایر از اول آذر تا پایان اردیبهشت می‌باشد، محاسبه‌ی توان باد و میزان آب قابل پمپاژ، برای این دوره انجام شد.

معادله‌ی ۱، فرمول اصلی محاسبه‌ی توان است.

$$\mathbf{P = 0.5 c_p \rho A v^3} \qquad (۱)$$

که در آن، P توان باد، ρ چگالی هوا، A مساحت پروانه‌ی توربین، v سرعت باد و c_p بازده‌ی توربین می‌باشد.

پس از تعیین توان مورد نیاز و زمان موجود، میزان کل انرژی استحصالی محاسبه شده و با توجه عمق آب چاه و بازده پمپ، مقدار آبی که در یک روز پمپ می‌شود، قابل محاسبه است. متأسفانه به علت عدم اطلاع از بازده توربین و پمپ، امکان استفاده از این معادله برای تعیین آب پمپاژ شده وجود نداشت. بنابراین از روش دیگری محاسبات صورت گرفت.

شرکت سازنده اطلاعاتی در رابطه با مقدار آب پمپ شده در یک سرعت باد و عمق آب معین ارائه کرده بود. با مقایسه‌ی سرعت باد و عمق چاهی که اندازه‌گیری‌های شرکت در آن صورت گرفته با سرعت باد در یک روز خاص و عمق آب در چاه مورد نظر، مقدار آبی که در یک روز پمپاژ می‌شود قابل محاسبه است.

با توجه به این که معمولاً توربین‌های بادی آبیاری در سرعت‌های کمتر از ۲/۵ متر بر ثانیه حرکت نمی‌کنند. سرعت‌های باد کمتر از این مقدار برابر با صفر در نظر گرفته شدند.

سپس از داده‌های سرعت باد میانگین‌گیری شد. انرژی باد با توان سوم سرعت باد رابطه مستقیم دارد. بنابراین ابتدا این مقادیر به توان سه رسیده و با هم جمع شدند. سپس با تقسیم مقدار به‌دست آمده و رادیکال‌گیری به فرجه‌ی سه، میانگین روزانه‌ی سرعت باد به‌دست آمد (معادله‌ی ۲).

$$\mathbf{v_{avr} = \left(\frac{v_1^3 + v_2^3 + v_3^3}{3}\right)^{\frac{1}{3}}} \qquad (۲)$$

در این معادله، v_{avr} سرعت متوسط باد در یک روز بر حسب متر بر ثانیه می‌باشد و v_1، v_2 و v_3 سرعت باد در زمان‌های ۱، ۲ و ۳ می‌باشند.

بر اساس اندازه‌گیری‌های انجام شده توسط شرکت سازنده، توربین بادی مورد استفاده در سرعت باد ۵/۵ متر بر ثانیه می‌تواند دبی ۲۲/۲۶۵ متر مکعب در روز را از چاهی با عمق ۱۰ متر، فرآهم کند. با توجه به این که عمق آب در منطقه‌ی مورد نظر نیز همین مقدار است، تنها عامل تعیین کننده، سرعت باد می‌باشد. بنابراین با فرض ثبات بازده توربین و پمپ در سرعت‌های مختلف و نیز با مقایسه‌ی سرعت باد روزانه با سرعت باد مرجع (۵/۵ متر بر ثانیه)، در تمام روزها حجم آب پمپاژ شده قابل محاسبه است. بنابراین پارامتری با نام نسبت توان معرفی شد که برابر است با نسبت توان باد در روز مورد نظر، به توان باد در سرعت باد مرجع. با توجه به رابطه‌ی توان باد با توان سوم سرعت باد، این پارامتر با معادله‌ی ۳ محاسبه می‌شود.

$$\mathbf{PR = \frac{v_{avr}^3}{v_{ref}^3}} \qquad (۳)$$

در این معادله، v_{ref} سرعت باد مرجع بر حسب متر بر ثانیه و PR نسبت توان می‌باشد.

با ضرب نسبت توان در یک روز در دبی مرجع (۲۲/۲۶۵ متر مکعب در روز)، میزان آب پمپاژ شده برای یک پمپ در روز مورد نظر به‌دست می‌آید (معادله‌ی ۴).

$$\mathbf{F = F_{ref} \times PR} \qquad (٤)$$

در این معادله، F_{ref} دبی مرجع بر حسب متر مکعب در روز و F دبی پمپ در روز مورد نظر می‌باشد.

با ضرب عدد به‌دست آمده در تعداد پمپ‌ها (به عبارت دیگر تعداد چاه‌ها)، کل دبی روزانه برای همه‌ی چاه‌های موجود در محل محاسبه می‌شود (معادله‌ی ۵).

$$\mathbf{F_t = F \times N_P} \qquad (٥)$$

در این معادله، Ft دبی کل پمپ‌ها و N_P تعداد پمپ‌ها می‌باشد.

برای یک واحد عشایری معمولی، مصرف آب روزانه برای کل افراد و دام‌های موجود در محل برابر ۱۲/۶۲ متر مکعب در روز می‌باشد که با توجه به تعداد خانوارهای معمول یک واحد عشایری، تعداد انواع احشام برای هر خانوار و مصرف روزانه‌ی آب هر دام، محاسبه شده است. مخزن نگهداری آب می‌تواند اندازه‌های مختلفی داشته باشد که معمول‌ترین آن استخر ۱۲۰ متر مکعبی است.

فرض بر این است که قبل از رسیدن عشایر به محل، پمپ نصب شده از چند روز قبل کار کرده و با توجه به این که مصرف آبی در آن زمان وجود ندارد، تا قبل از رسیدن عشایر، مخزن کاملاً پر می‌شود. بنابراین در ابتدای رسیدن عشایر، آب موجود در مخزن برابر با کل ظرفیت مخزن در نظر گرفته می‌شود. طبق معادله‌ی ۶، با اضافه کردن آب پمپ شده در هر روز به آب موجود در مخزن و کسر مصرف آب روزانه از آن، میزان ذخیره‌ی آب در ابتدای روز بعد تعیین می‌شود.

$$\boldsymbol{S_{n+1} = S_n + F_t - C_d} \qquad (٦)$$

در این معادله، S_n مقدار آب موجود در استخر در روز مورد نظر (روز n ام)، S_{n+1} مقدار آب موجود در استخر در روز بعد (روز n+1 ام) و C_d مقدار مصرف آب در همان روز است.

بنابراین برای هر روز به طور جداگانه، میزان آب پمپ شده محاسبه می‌گردد و با مقایسه با مصرف آب روزانه، میزان آبی که به مخزن اضافه یا کم می‌شود مشخص می‌شود. بدیهی است، میزان ذخیره‌ی آب مخزن حداقل صفر و حداکثر برابر با حجم مخزن می‌تواند باشد.

در صورتی که حجم آب ذخیره شده‌ی محاسبه شده بیش از ظرفیت مخزن باشد، ذخیره آب مخزن برای روز بعد برابر با حجم مخزن در نظر گرفته می‌شود. یعنی قبل از اتمام شبانه روز، ظرفیت مخزن پر شده و پمپ از کار می‌افتد.

در صورتی که حجم آب ذخیره شده‌ی محاسبه شده عددی منفی باشد، ذخیره آب مخزن برای روز بعد، برابر با صفر در نظر گرفته می‌شود. در این شرایط، مجموع آب پمپ شده در روز مورد نظر و ذخیره‌ی آب مخزن از روز قبل، کفایت مصرف آب روزانه‌ی عشایر را نکرده و کمبود آب در آن روز باید با روش‌های دیگر مانند انتقال آب با تانکر جبران شود.

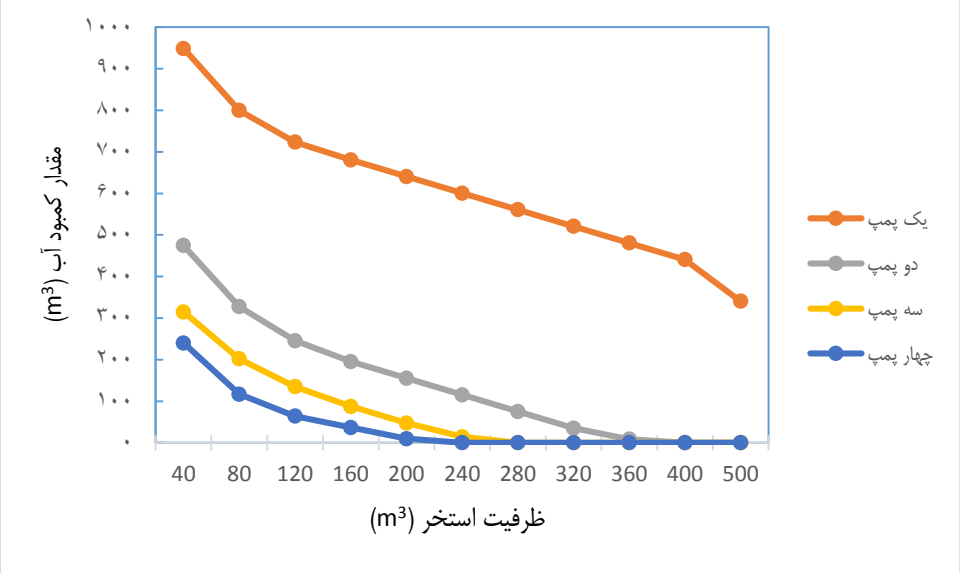
محاسبات ذکر شده، برای تمام روزهای فصل اسکان عشایر در هر سال انجام شد و در نهایت کل حجم کمبود آب در طول فصل اسکان و همچنین تعداد روزهایی که کمبود آب در آن اتفاق می‌افتد محاسبه شدند. در نهایت میانگین این دو پارامتر اخیر برای هر چهار سال تعیین شد. با تغییر تعداد پمپ‌ها و حجم مخزن، میزان محاسبه شده‌ی کل حجم کمبود آب و همچنین تعداد روزهای کمبود آب در طول فصل اسکان، تغییر یافت.

نتایج و بحث

محاسبات مقدار کمبود آب و تعداد روزهایی که در آن‌ها، کمبود آب صورت می‌گیرد با توجه به تعداد پمپ‌ها و حجم استخر مورد استفاده در طول یک فصل اسکان، انجام شد که اطلاعات مربوطه در جدول ۱ وجود دارد. شکل ۲ نیز روند کاهش مقدار کمبود آب با افزایش حجم استخر را در تعداد پمپ‌های مختلف نشان می‌دهد.

جدول ۱: داده‌های کمبود آب مربوط به استفاده از تعداد پمپ‌ها و با حجم مخزن‌های مختلف

تعداد روزهای کمبود آب				حجم کمبود آب (m^3)				ظرفیت
۴	۳	۲	۱	۴	۳	۲	۱	تعداد پمپ	استخر (m^3)
۲۳	۳۲	۵۲/۷	۱۰۸/۷	۲۴۰	۳۱۴/۷	۴۷۴/۵	۹۴۸/۸		۴۰
۱۳/۳	۲۲/۷	۳۵/۷	۸۹/۳	۱۱۶/۸	۲۰۱/۹	۳۲۷/۵	۷۹۹/۸		۸۰
۷	۱۵/۳	۲۷/۳	۷۹/۷	۶۴/۱	۱۳۴/۸	۲۴۵/۷	۷۲۳/۴		۱۲۰
۴	۱۰	۲۲	۷۵	۳۶/۵	۸۷/۶	۱۹۵/۳	۶۸۰/۸		۱۶۰
۱	۵	۱۸/۷	۷۰	۹/۹	۴۷/۶	۱۵۵/۳	۶۴۰/۸		۲۰۰
۰	۱	۱۳	۶۶	۰	۱۴/۵	۱۱۵/۳	۶۰۰/۸		۲۴۰
۰	۰	۹	۶۲/۳	۰	۰	۷۵/۳	۵۶۰/۸		۲۸۰
۰	۰	۴/۷	۵۸/۷	۰	۰	۳۵/۳	۵۲۰/۸		۳۲۰
۰	۰	۱	۵۵	۰	۰	۸/۴	۴۸۰/۸		۳۶۰
۰	۰	۰	۵۲	۰	۰	۰	۴۴۰/۸		۴۰۰
۰	۰	۰	۴۱/۳	۰	۰	۰	۳۴۰/۸		۵۰۰
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰		۱۰۰۰



شکل ۲: روند کاهش حجم کمبود آب با افزایش ظرفیت مخزن برای تعداد پمپ‌های مختلف

همان‌طور که در جدول ۱ و شکل ۲ نشان داده شده است، با افزایش حجم مخزن، حجم کمبود آب و همچنین تعداد روزهای کمبود آب کاهش می‌یابد. با افزایش بیش‌تر حجم مخزن، به نقطه‌ای می‌رسیم که تمامی روزها آب کافی برای مصرف واحد عشایری وجود دارد و بنابراین در هیچ روز کمبود آب وجود ندارد.

با افزایش تعداد پمپ‌ها، در یک حجم مخزن یکسان، میزان کمبود آب کاهش می‌یابد و با افزایش حجم مخزن، روند کاهش حجم کمبود آب، نرخ سریع‌تری خواهد داشت و در نتیجه، زودتر به نقطه‌ای می‌رسیم که حجم کمبود آب صفر است. بنابراین برای جلوگیری از کمبود آب، به حجم مخزن کمتری نیاز خواهد بود.

نتیجه‌گیری کلی

با افزایش تعداد چاه‌ها و پمپ‌ها و همچنین افزایش حجم مخزن، احتمال ایجاد شرایطی که منجر به کمبود آب می‌شود، کاهش می‌یابد. ولی این کار باعث افزایش هزینه‌های احداث واحد پمپاژ آب می‌شود. از طرف دیگر کوچک بودن حجم مخزن و کم بودن تعداد پمپ‌ها (یا چاه‌ها)، مخصوصاً در مناطق کم‌باد و یا مناطقی که عمق آب زیرزمینی آن پایین است، باعث افزایش روزهای کمبود آب می‌شود که به علت نیاز بسیار زیاد به انتقال آب توسط تانکر، هزینه‌های واحد عشایری افزایش می‌یابد. بهتر است یک حالت بینابینی اتخاذ گردد که جمع هزینه‌ها، کمترین میزان باشد. البته برای تعیین مقدار بهینه‌ی حجم مخزن و تعداد پمپ‌ها، نیاز به اطلاعات جزئی در رابطه با هزینه‌های احداث مخزن، احداث چاه و نصب پمپ، انتقال آب با تانکر و برخی اقلام دیگر هزینه می‌باشد. به غیر از تعداد توربین‌ها و حجم استخر، اندازه‌ی توربین یا توربین‌های مورد استفاده را نیز می‌توان به عنوان متغیر تصمیم‌گیری در نظر گرفت.

از مسائلی که برای افزایش دقت محاسبات می‌توان در نظر گرفت، تبخیر روزانه از سطح استخر و مقدار آبی است که از طریق بارندگی روی سطح استخر اضافه می‌شود. البته در این حالت به غیر از حجم استخر و مساحت استخر، پارامترهای هواشناسی مؤثر در تبخیر از سطح آب، مانند رطوبت نسبی، دما، سرعت باد، تابش آفتاب نیز مورد نیاز خواهد بود.

منابع

Bragg, G. M., and W. L. Schmidt. 1979. Performance matching and optimization of wind powered water pumping systems. Energy Conversion 19: 33-39.

Chen, C. L., H. C. Chen, and J. Y. Lee. 2016. Application of a generic superstructure-based formulation to the design of wind-pumped-storage hybrid systems on remote islands. Energy Conversion and Management 111: 339–351.

Díaz-González, F, A. Sumper, O. Gomis-Bellmunt, and R. Villafáfila-Robles. 2012. A review of energy storage technologies for wind power applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews 16: 2154–2171.

Fraenkel, P., F. Crick, and R. Barlow. 1996. Development of a new small windpump for manufacture in developing countries. Solar Energy 58: 3-8.

Gopal, C., M. Mohanraj, P. Chandramohan, and P. Chandrasekar. 2013. Renewable energy source water pumping systems—A literature review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 25: 351–370.

Lara, D. D., G. G. Merino, B. J. Pavez, and J. A. Tapia. 2011. Efficiency assessment of a wind pumping system. Energy Conversion and Management 52: 795–803.

Panda, R. K., T. K. Sarkar, and A. K. Bhattacharya. 1987. Chance-constrained Optimal Windmill Irrigation System Design. Agricultural Water Managernent 12: 279-291.

Peillón, M., and R. Sánchez, A. M. Tarquis, and J. L. García-Fernández. 2013. The use of wind pumps for greenhouse microirrigation: A case study for tomato in Cuba. Agricultural Water Management 120: 107–114.

Rehman, S., and A. Z. Sahin. 2012. Wind power utilization for water pumping using small wind turbines in Saudi Arabia: A techno-economical review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 16: 4470–4478.

Rodrigues, E. M. G., R. Godina, S. F. Santosa, A. W. Bizuayehua, J. Contrerasc, and J. P. S. Catalãoa. 2014. Energy storage systems supporting increased penetration of renewables in islanded systems. Energy 75: 265–280.

Suleimani, Z., and N. Rao. 2000. Wind-powered electric water-pumping system installed in a remote location. Applied Energy 65: 339–47.