DOR: 20.1001.1.24234931.1400.8.2.14.0

سال هشتم، شماره دوم، پاییز و زمستان ۱۴۰۰، ص ص ۱۳۱-۱۳۸

فصل‌نامه علمی انرژی‌های تجدیدپذیر و نو

jrenew.ir

مقاله ترویجی

تاریخ دریافت: ۹۹/۰۶/۱۸

تاریخ پذیرش: ۰۰/۰۳/۱۴

مروری بر نیروگاه‌های برقآبی کوچک در ایران و جهان: ظرفیت‌های بالقوه و درحال بهره‌برداری، چالش‌ها و فرصت‌ها

جواد معینی هادی‌زاده[۱]*

۱- کارشناس ارشد، مهندسی برق - سیستم‌های قدرت، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران

* کاشمر، ۹۶۹۴۹-۹۶۷۱۹، sjmoini1367@yahoo.com

چکیده

در سال‌های اخیر افزایش تقاضای انرژی الکتریکی در کنار آلایندگی و پایان‌پذیری سوخت‌های فسیلی، کشورهای مختلف جهان را به استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر ترغیب کرده‌است. نیروگاه‌های برقآبی کوچک یکی از جدیدترین نیروگاه‌های تجدیدپذیر هستند که آن‌ها را می‌توان روی رودخانه‌های کوچک به صورت جریانی و بدون نیاز به سد احداث نمود. در این مقاله، ساختمان این نیروگاه‌ها، امکان‌سنجی و تحلیل‌های اقتصادی مربوطه و درنهایت، کارهای انجام شده و ظرفیت‌های بالقوه‌ی آن‌ها در ایران مورد بحث و بررسی قرار گرفته‌است. نتایج نشان می‌دهد که ظرفیت‌های بالقوه‌ی زیادی برای این نیروگاه‌ها در بسیاری از کشورهای جهان علی‌الخصوص کشورهای درحال توسعه وجود دارد. احداث و بهره‌برداری ساده‌تر، مشکلات زیست‌محیطی کمتر و قابلیّت مشارکت در ریزشبکه از مهم‌ترین مزایای این نیروگاه‌ها در مقایسه با نیروگاه‌های برقآبی بزرگ هستند. همچنین احداث این نیروگاه‌ها در مناطق روستایی و دور از شبکه می‌تواند منجر به اشتغال‌زایی شود؛ منافع اقتصادی را به دنبال داشته باشد و وابستگیِ این مناطق را به شبکه کاهش دهد. پیشرفت تحقیقات در سال‌های اخیر، نیروگاه‌های آبی کوچک را به یک فن‌آوری بالغ و همه‌کاره تبدیل کرده‌است که درصورت رفع موانع فنّی، اجتماعی و زیست‌محیطی و درکنار آن، وضع قوانین مناسب و سیاست های تشویقی، می‌توانند نقش قابل ملاحظه‌ای در تأمین تقاضای انرژی الکتریکی از محل منابع تجدیدپذیر ایفا نمایند.

کلیدواژگان: نیروگاه‌های برقآبی کوچک، تولیدات تجدیدپذیر، ریزشبکه

A Review of Small Hydropower Plants in Iran and the World: Installed and Potential Capacities, Challenges and Opportunities

Javad Moeini Hadizadeh[1] *

1- Master of Electrical Power Engineering, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran

* P.O.B. 9671996949 Kashmar, Iran, sjmoini1367@yahoo.com

Received: 8 September 2020 Accepted: 4 June 2021

Abstract

In recent years, increasing demand for electricity, along with pollution and the depletion of fossil fuels, has encouraged countries around the world to use renewable energy. Small hydropower plants are one of the newest renewable power plants that can be built on small rivers without the need for a dam. In this article, the construction of these power plants, feasibility studies and related economic analyzes, and finally, the work done and their potential capacities, in Iran, will be discussed. The results show that there is a lot of potential for these power plants in many countries of the world, especially developing countries. Easier construction and operation, less environmental problems and the ability to participate in the microgrid are the most important advantages of these power plants. Furthermore, the construction of these power plants in rural areas and away from the network can lead to job creation; Pursue economic benefits and reduce the dependence of these areas on the main power system. Advances in research in recent years have made small hydropower plants a mature and versatile technology that, if technical, social, and environmental barriers are removed, along with appropriate legislation and incentive policies, can play a significant role in meeting the demand for electricity from renewable resources.

Keywords: Small hydropower plants, Renewable energy resources, Microgrid

مالکیت معنوی این مقاله تحت گواهی بین المللی تخصیص ۴ کریتیو کامنز محفوظ است

۱- مقدمه

مزایای فراوان از جمله انرژی ارزان، منابع در دسترس و تمام‌نشدنی، نداشتن آلایندگی‌های زیست‌محیطی و کمک به کاهش گاز CO_2 در جوّ زمین از جمله مهم‌ترین دلایل روی آوری به منابع انرژی تجدیدپذیر در سال‌های اخیر است [۱]. ماهیت روبه‌زوال سوخت‌های فسیلی از جمله نفت و گاز طبیعی که مهم‌ترین منابع تولید انرژی الکتریکی در کشورهای وابسته به نفت هستند، اهمیت گرایش به انرژی‌های تجدیدپذیر را دوچندان کرده‌است. ضرورت دست‌یابی به استقلال انرژی در این کشورها می‌طلبد که ظرفیت‌های بالقوه‌ی تجدیدپذیر بیشتر و سریعتر مورد بررسی قرار گیرند [۲]. بهره‌برداری از انرژی‌های تجدیدپذیر منجر به تغییر ساختار تولید انرژی الکتریکی از نوع متمرکز به توزیع‌شده گردیده‌است که با توجه به جوانب مثبتِ استفاده از تولیدات پراکنده نسبت به تولیدات متمرکز، یک مزیت جانبیِ بزرگ برای تولیدات تجدیدپذیر محسوب می‌شود. خوشبختانه رشد قابل ملاحظه‌ی پژوهش‌های انجام‌شده و در حال انجام در حوزه‌ی ریزشبکه‌ها، آن‌ها را به یک بستر مناسب و قابل اطمینان برای استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر تبدیل کرده‌است و این امکان را فراهم نموده که چالش‌های این تولیدات از جمله عدم قطعیّت انرژی، تاثیرات نامطلوب بر شبکه برق و سایر مسائل فنی را بتوان مرتفع نمود. لذا استفاده‌ی بیشتر از ظرفیت‌های بالقوه‌ی تجدیدپذیر با امید به حل چالش‌های پیش روی آن‌ها در آینده بسیار نزدیک، امکان‌پذیر خواهد بود.

بر اساس گزارش [۳] بیش از ۳۳ درصد تولید برق در جهان از انرژی‌های تجدیدپذیر صورت می‌پذیرد که تولیدات برقآبی بیشترین بخش آن را شامل می‌شوند. بنا به دلایلی رشد این تولیدات در مقایسه با تولیدات خورشیدی و بادی کمتر است. در مقابلِ مزایای آن، تولید برق به روش سنتیِ برقآبی هزینه‌های زیادی برای احداث سد و تجهیزات جانبی و همچنین انتقال انرژی الکتریکی به همراه دارد. همچنین این روش تولید برق با سیاست تمرکززدایی در سیستم قدرت و بحث تولیدات پراکنده در تناقض است. افزون بر این، مسائل زیست‌محیطی در اثر احداث سد، از جمله تغییر چشم انداز طبیعت و افزایش گازهای گلخانه‌ای در اثر فعّالیّت‌های داخل مخازن ذخیره و همچنین قطع درختان به منظور احداث سد از دیگر مشکلات نیروگاه‌های برقآبی بزرگ قلمداد می‌شود [۴].

چالش‌های پیش روی نیروگاه‌های برقآبی بزرگ در عین جذابیّتِ استفاده از انرژیِ پاک و تجدیدپذیرِ آن و همچنین گرایش شدید پژوهشگران حوزه سیستم قدرت به تولیدات پراکنده، منجر به ظهور و شکوفایی روش دیگری برای تولید برقآبی به نام نیروگاه‌های برقآبی کوچک[1] شده‌است. در این نیروگاه‌ها بدلیل نبودِ سد، تعادل اکولوژیکی بر هم نمی‌خورد و مشکلات زیست‌محیطی ناشی از سدهای بزرگ حل می‌شود. بعلاوه زمین مورد نیاز در ازای تولید ۱ مگاوات برق برای احداث این نیروگاه‌ها حدوداً نصف نیروگاه‌های برقآبی بزرگ است [۵]. از مهم‌ترین مزایای این نیروگاه‌ها علاوه بر عدم نیاز به احداث سد، عدم نیاز به مخزن (در بیشتر موارد) و قابلیت احداث و بهره‌برداری در رودخانه‌های با جریان کم را می‌توان برشمرد. این نیروگاه‌ها سرعت راه‌اندازی بالاتری نسبت به نیروگاه‌های برقآبی سنتی دارند و همچنین در آن‌ها امکان تطابق سریع‌تر با توان خروجی وجود دارد. نرخ خرابی این نیروگاهها کم بوده و بالطبع از قابلیت اطمینان بالاتری برخوردارند [۶]. پایداری تولید انرژی، کم بودن هزینه‌های تعمیر و نگه‌داری، سازگاری بیشتر با محیط زیست، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، افزایش سطح زندگی روزمره (خصوصاً در مناطق روستایی)، اشتغال‌زایی، منافع اقتصادی و کاهش وابستگیِ مناطق دور از شبکه از مزایای دیگر آنهاست [۴،۷]. خوشبختانه پیشرفت تحقیقات در سال‌های اخیر نیروگاه‌های آبی کوچک را به یک فن‌آوری بالغ و همه‌کاره مبدل ساخته‌است [۷].

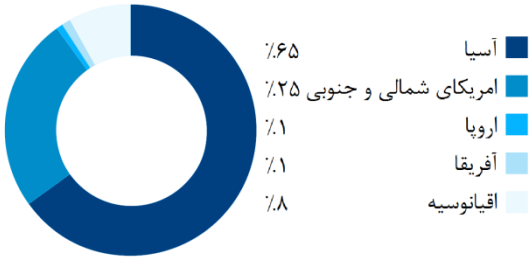
۲- توجه به نیروگاه‌های برقآبی کوچک در ایران و جهان

اگرچه توجه ویژه به انرژی‌های نو را در سراسر جهان می‌توان دید، در سال‌های اخیر روی‌آوری به این انرژی‌ها بیشتر در کشورهای درحال توسعه و خصوصاً با هدف تأمین برق اماکن روستایی دور از شبکه اتفاق افتاده‌است [۳]. کشورمان ایران نیز یکی از این کشورهاست که علی‌رغم موفقیّت‌های قابل توجه، نیازمند کار بیشتر در این حوزه است. ایران برنامه‌ی افزایش تولیدات تجدیدپذیر را تا حدود ۵ گیگاوات برای سال ۲۰۲۰ داشته که همه‌ی آن از محلّ خورشیدی و باد بوده‌است [۳]. با توجه به شرایط زیست‌محیطی و اهداف اقتصادی و اجتماعی مرتبط با نیروگاه‌های برقآبی کوچک، می‌تواند بخشی از تولیدات تجدیدپذیر را به این سو سوق داد. در کشورمان ایران این نیروگاه‌ها به دلیل چشم‌اندازهایی از جمله تأمین برق مناطق روستایی، شرایط زندگی بهتر و ارتقای سطح فرهنگ، دانش و سلامت روستاییان و اشتغال‌زایی مورد توجه قرار گرفته‌اند [۴]. ایران جزو کشورهایی است که برای این نیروگاه‌ها سیاست خرید تضمینی برق دارند و این نکته یک فرصت مناسب برای سرمایه‌گذاری در نظر گرفته‌می‌شود [۷].

شکل ۱ میزان تولیدات برقآبی را در سطح جهان، در مقایسه با سایر تولیدات تجدیدپذیر نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که در صورت تحقّق ظرفیت‌های بالقوه، نیروگاهای برقآبی کوچک می‌توانند سهم قابل توجهی از تولیدات تجدیدپذیر را تأمین نمایند.

شکل ۲ کل ظرفیت نصب‌شده نیروگاه‌های برقآبی کوچک را به تفکیک منطقه در سطح جهان نشان می‌دهد. بخش عظیمی از این نوع تولیدات در

شکل ۱ مقایسه ظرفیت‌های بالقوه و نصب‌شده نیروگاه‌های برقآبی کوچک با سایر تولیدات تجدیدپذیر در جهان[۷].

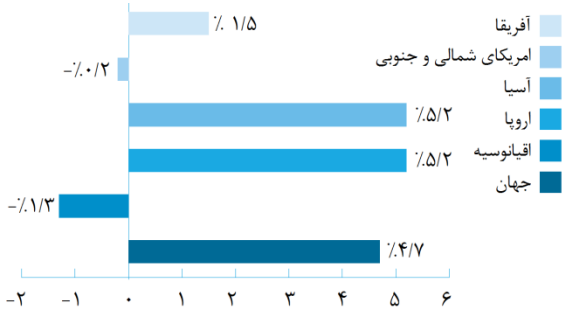


شکل ۲ کل ظرفیت نصب‌شده نیروگاه‌های آبی کوچک در بخش‌های مختلف جهان[۷].

1. Small hydro power plant

قاره آسیا نصب شده‌اند که کشور پهناور چین بخش مهمی از آن‌ها را در خود جای داده‌است.

در مقایسه با ۲۰۱۳ میزان کل ظرفیت نیروگاهای برقآبی کوچک در جهان حدود ۱۰ درصد و نسبت به ۲۰۱۶ حدود ۴/۷ درصد افزایش داشته و به ۷۸ گیگاوات رسیده‌است (شکل ۳) [۷]. این در حالی است که در برخی مناطق جهان به دلیل ارجحیّت سایر تولیدات از قبیل بادی و خورشیدی و جمع‌آوری فن‌آوری‌های قدیمی برقآبی کوچک، این نوع از تولیدات اندکی کاهش نیز داشته‌اند. در مقابل در کشورهای توسعه‌یافته‌ای از قبیل چین، رشد این نوع تولیدات به شکل قابل ملاحظه‌ای زیاد است و روشن است که روش تولید برقآبی کوچک به عنوان یکی از راه‌های مطمئن و مقرون‌به‌صرفه جهت پرکردن خلاء کمبود انرژی مورد عطف قرار گرفته‌است.



شکل ۳ تغییر ظرفیت نصب شده از ۲۰۱۶ تا ۲۰۱۹ [۷].

با وجود توجیهات قابل قبول و جذاب نیروگاه‌های آبی کوچک در تولید انرژی الکتریکی، مشکلات اجرایی متعددی در مسیر ساخت و بهره‌برداری از این نیروگاه‌ها در سراسر جهان وجود دارد. تفاوت در رشد این تولیدات در کشورهای مختلف به نوعی مبیّن میزان موفقیت آن‌ها در حل این مشکلات است. موانع اجرایی سد راه توسعه برقآبی‌های کوچک را می‌توان به صورت زیر برشمرد [۷]:

- عدم دسترسی به اطلاعات به‌روز و دقیق
- فقدان تمرکز سیاسی روی این نیروگاه‌ها
- سخت بودن دست‌یابی به منابع مناسب برای پشتیبانی مالی
- نبود سیاست‌ها و قوانین حمایت‌کننده
- نبود انگیزش‌های لازم برای محقّقین و اجراکنندگان پروژه
- فقدان تکنولوژی‌ها و مهارت‌های محلّی
- نبود زیرساخت‌ها و مشکلات برای ساخت شبکه‌ی برق
- قوانین زیست‌محیطی محدود کننده
- مقرّرات اداری[1] پیچیده و زمان‌بر
- دیدگاه منفی جامعه
- تاثیرات تغییرات آب و هوایی (که قابلیت اطمینان آنها را تهدید می‌کند)

با این وجود، در تعداد قابل ملاحظه‌ای از کشورها چشم‌انداز افزایش تولید تجدیدپذیر از محل تولیدات برقآبی کوچک وجود دارد که به نوعی نشان‌دهنده توانایی آن‌ها در رفع موانع فوق است. مدیریت صحیح در حل مشکلاتِ پیش روی نیروگاه‌های برقآبیِ کوچک توانسته‌است کشور اندونزی را به یکی از این کشورها مبدل سازد. این کشور قصد دارد تا سال ۲۰۲۵، ۲ گیگاوات تولید برقآبی را محقق کند که ۰/۴۳ آن از نوع برقآبی کوچک است [۳].

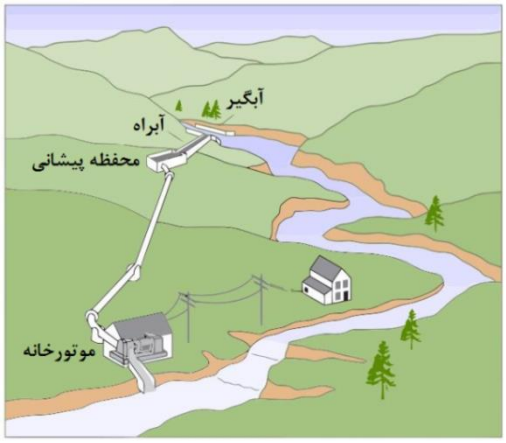
1. Bureaucracy

اندونزی ۷۵۰۰۰ مگاوات ظرفیت بالقوه برای تولید انرژی الکتریکی از نیروگاه های برقآبی کوچک دارد که تا ۲۰۱۸، ۸ درصد آن نصب شده‌است. این کشور قصد دارد تا ۲۰۲۵ این انرژی را به ۲۸۴۶ مگاوات برساند که درصورت ادامه این روند و با وجود ظرفیت‌های بالقوه‌ی اشاره شده، دست‌یافتنی است [۸].

۳- ساختمان نیروگاه

۳-۱- طرح کلی نیروگاه

به طور کلی می‌توان نیروگاه‌های آبی را به دو روش ذخیره‌ای و جریانی احداث کرد. نیروگاه‌های سنتی از نوع ذخیره‌ای هستند که در آنها سد احداث می‌شود. نیروگاه‌های کوچک معمولاً از نوع جریانی هستند. در این نیروگاه‌ها با تغییر مسیر جریان رودخانه می‌توان فرازه[2] آب را افزایش داده و در مسیر آن توربین را قرار داد (شکل ۴) [۵]. البته نیروگاه‌های برقآبی کوچک را به روش‌های مختلفی می‌توان احداث کرد. آب رودخانه پس از عبور از کانال انحرافی به مخزن پیشانی می‌رسد. حضور مخزن پیشانی به تأمین پیوسته انرژی کمک می‌کند. آب پس از عبور از مخزن پیشانی در تونل آب‌بر جریان پیدا کرده و به دلیل ارتفاع زیاد به سرعت به پایین و به توربین سرازیر می‌شود. با چرخاندن توربین انرژی مکانیکی تولیدشده و این انرژی توسط ژنراتور به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود. این نیروگاه‌ها همچنین مجهز به شیر کنترل هستند و ماکزیمم توان زمانی تولید می‌شود که شیر کنترل کاملاً باز باشد [۹].



شکل ۴ نمای ساده یک نیروگاه آبی کوچک[۱۲].

نیروگاههای برقآبی را از لحاظ ظرفیت به ۵ گروه می‌توان تقسیم‌بندی کرد [۴]. این تقسیم‌بندی در جدول ۱ آمده است. در این مقاله منظور از نیروگاه-های آبیِ کوچک، سه نوعِ کوچک، مینی و میکرو می‌باشد.

جدول ۱ تقسیم‌بندی انواع نیروگاه‌های برقآبی کوچک بر اساس اندازه آن‌ها [۴]

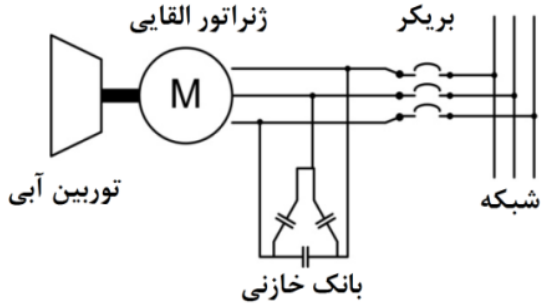
نوع نیروگاه	ظرفیت
بزرگ	بیشتر از ۱۰۰ مگاوات
متوسط	۱۰ تا ۱۰۰ مگاوات
کوچک	۱ تا ۱۰ مگاوات
مینی[3]	۱۰۰ کیلووات تا ۱ مگاوات
میکرو[4]	کمتر از ۱۰۰ کیلووات

2. Head
3. Mini-hydro
4. Micro-hydro

۲-۳- ژنراتورهای مورد استفاده

در این نیروگاهها از دو نوع ژنراتور القائی رتورقفسی (در ژنراتورهای کوچکتر از ۱۰ کیلووات) و سنکرون قطب برجسته (برای قدرت‌های بالاتر) استفاده می‌شود [۱۰]. استفاده از ژنراتورهای سنکرون قطب‌برجسته بهره‌وری بیشتری نسبت به سایر ژنراتورهای دارد [۱۱]. البته در این ژنراتورها کاهش گشتاور دندانه‌ای[1] ایجادشده منتج از اثر متقابل میدان مغناطیسی رتور و استاتور، خود یک چالش است. خوشبختانه تاکنون رهیافت‌های تئوری مناسبی برای این چالش مطرح شده‌است؛ با این وجود استفاده از این نتایج و در شرایط خاص بهره‌برداری به عنوان ژنراتور نیروگاه برقآبی نیازمند کار عملی است [۱۱].

ژنراتورهای القایی رتورقفسی به دلیل ویژگی‌های شناخته شده‌ای که دارند گزینه‌ی بسیار مطلوبی برای نیروگاه‌های آبی کوچک هستند. توان‌مندی، تراکم قدرت بالا، نیاز کمتر به تعمیر و نگهداری، طراحی ساده، خودمراقبتی، عدم نیاز به سیستم تحریک، ارزان بودن و توانایی کار هم به صورت متصل و هم جدا از شبکه از مزایای این ژنراتورهاست. عیب این ژنراتور نیاز به بانک خازنی به منظور تأمین ولتاژ ترمینال است [۶]. روش استفاده از بانک خازنی در این ژنراتورها در شکل ۵ آمده است.

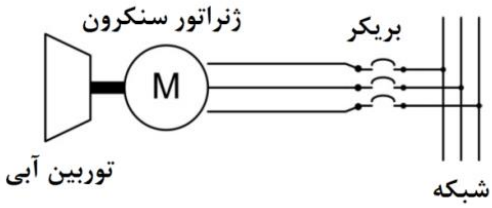


شکل ۵ نحوه استفاده از بانک خازنی در ژنراتورهای القایی[۶].

امروزه با پیشرفت فناوری‌های اینورتر[2]، مشکل هم‌زمانی[3] این ژنراتورها با شبکه چندان مطرح نیست. با استفاده از کانورتر[4]های AC/DC/AC می‌توان ژنراتورهای آسنکرون را با تنظیم فرکانس مورد نیاز به شبکه متصل کرد. استفاده از این کانورترها همچنین باعث خفه‌کنندگی نوسانات گذرای توان می‌شوند [۱۳].

در مقابل، ژنراتورهای سنکرون به دلیل تکنولوژی کنترل آن گزینه‌ی مطمئن‌تری نسبت به نوع آسنکرون هستند. این ژنراتورها مجهز به تنظیم‌کننده اتوماتیک ولتاژ[5] (AVR) هستند که به آنها این امکان را می‌دهد که بتوانند ضریب قدرت خروجی را به طور مستقیم و با تغییر جریان تحریک کنترل نمایند. البته این ژنراتورها هزینه‌ی بیشتر و تعمیر و نگهداری مشکل‌تری نسبت به ژنراتورهای القایی دارند [۶]. نحوه اتصال این ژنراتورها به شبکه در شکل ۶ مشاهده می‌شود.

1. Cogging torque
2. Inverter
3. Synchronism
4. Converter
5. Automatic Voltage Regulator



شکل ۶ نحوه اتصال ژنراتور سنکرون به شبکه قدرت[۶].

۳-۳- توربین

به طور کلی انواع توربین‌های آبی را می‌توان از لحاظ فرازه به سه گروه تقسیم کرد [۹]:

- با فرازه‌ی کوتاه (تا ۴۰ متر): کاپلان[6] و توربینهای ملخی[7]
- با فرازه‌ی متوسط (۴۰ تا ۱۰۰ متر): فرانسیس[8]، پلتون[9]، پمپ به‌عنوان توربین[10] و توربین‌های جریان متقاطع[11]
- با فرازه‌ی بلند (بیش از ۱۰۰ متر): تورگو[12] و پلتون

با هدف کاربری توربین آبی در نیروگاه‌های برقآبی کوچک، در هنگام انتخاب آن‌ها، ضروری است مشخصاتی از قبیل توان خروجی و دبی تخلیه مورد توجه قرار گیرد. در جدول ۲ تعدادی از توربین‌های مطالعه شده برای نیروگاه‌های آبی کوچک به همراه اطلاعات آنها و نتایج پژوهش‌های عملی انجام شده در مورد توان خروجی و بهره‌وری آنها داده شده‌است [۹].

۴- امکان‌سنجی و تحلیل اقتصادی

توان تولیدی نیروگاه برقآبی را می‌توان از رابطه‌ی (۱) محاسبه کرد.

$$P_T = \rho g Q H \qquad (۱)$$

که در آن P_T توان تئوری خروجی بر حسب وات، ρ چگالی آب بر حسب کیلوگرم بر مترمکعب، g شتاب جاذبه زمین بر حسب متر بر مجذور ثانیه، Q دبی آب بر حسب مترمکعب بر ثانیه و H ارتفاع مفید آب‌ریز بر حسب متر می‌باشد.

برای محاسبه توان مفید خروجی نیروگاه لازم است ضریب بازده نیروگاه نیز در نظر گرفته شود. با این تفسیر توان مفید خروجی نیروگاه برابر خواهد بود با:

$$P_{out} = P_T \times Ra \qquad (۲)$$

که در آن P_{out} توان مفید خروجی بر حسب وات و Ra بازده یا راندمان مجموعه ژنراتور و توربین می‌باشد [۸].

با توجه به دو رابطه‌ی (۲) و (۱) مشاهده می‌شود که توان تولیدی نیروگاه برقآبی ارتباط مستقیمی با حاصلضرب دبی آب در فرازه‌ی نیروگاه دارد. لذا جهت مطالعات مکان‌یابی برای احداث نیروگاه‌های کوچک بر روی رودخانه‌های موجود در کشور و همچنین بهره‌برداری از آن‌ها، مطالعه‌ی دبی آب و فرازه‌ی قابل اجرا اهمیّت فراوانی دارد. باید توجه داشت که این دو کمیّت با شرایط جغرافیایی منطقه و میزان بارندگی ارتباط دارند [۸].

6. Kaplan
7. Propeller
8. Francis
9. Pelton Wheel
10. Pump as Turbine
11. Cross Flow
12. Turgo

جدول ۲ تعدادی از توربین‌های مورد مطالعه برای نیروگاه‌های برقآبی کوچک [۹]

نوع توربین	فرازه مفید (m)	دبی تخلیه (l/s)	توان خروجی (kw)	بهره‌وری (٪)
پمپ محوری به عنوان توربین	۴	۲۰۰	۶	۶۱
توربین عکس العملی	۱/۴۵	۳۰	۰/۲۸	۶۵-۷۰
توربین پمپ گریز از مرکز تک‌مرحله‌ای	۱۵	۲۵	۳	۶۰
ملخی (پروانه‌ای)	۴-۹	-	۲۰	۶۸
پمپ به عنوان توربین	۲۵	۱۵۰	۳۰	-
توربین هیدرولیک نانو	۱/۲	۱-۳	۰/۰-۲/۱	۲۰
توربین محوری (کاپلان)	۲۴	۱۱۷		۸۵
توربین متقاطع		۸۲۰		۸۹
	۸-۱۰/۵	۱۰-۷۰		۵۵
	۳۵	۱۳۵		۷۰
	۵/۵	۱۰۰	۳/۵	۸۵
	۶	۱۷۵	۶/۲	۶۰
	۳	۴۲۰	۲/۵	۸۳
	۱۰	۱۰۰	۷/۳	۷۷
توربین پلتون و تورگو	۱۳-۲۸		۵>	۸۰
توربین عکس‌العملی ساده	۱-۴	۱-۸	۰/۱۵	۵۰
توربین تورگو	۳/۱-۵	۱۰	۰/۲۵	۸۷-۹۱
پمپ به عنوان توربین	۵/۹۸	۱۳۳	۶/۲	۷۹

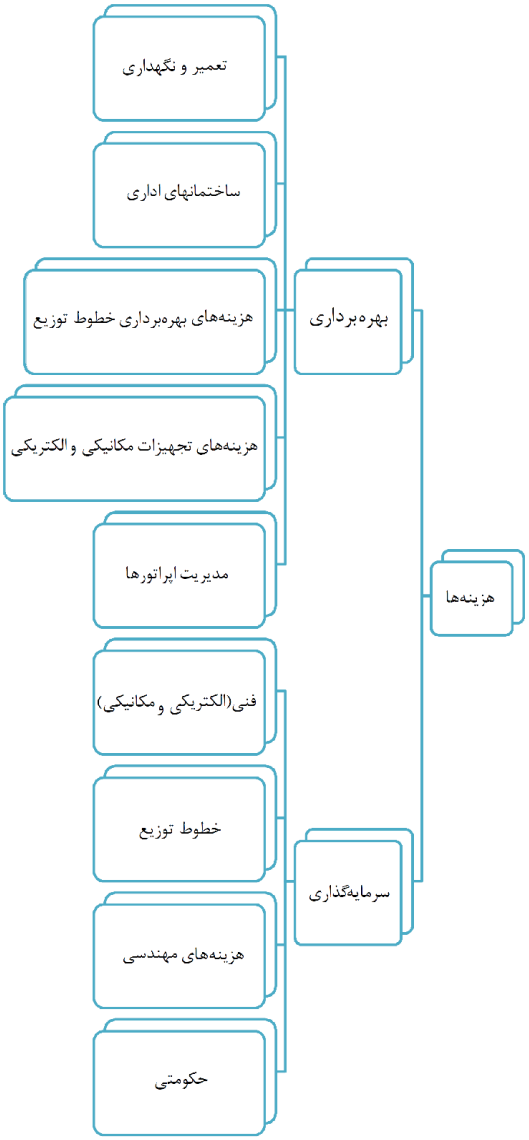
جهت محاسبه‌ی دبی آب رودخانه می‌توان از دو روش معمول استفاده کرد. برای رودخانه‌های کوچک با دبی کم می‌توان از روش حجمی بهره‌برد که در آن با تقسیم حجم ظرف آب در مدت زمان لازم برای پرشدن ظرف، دبی به‌دست می‌آید. در رودخانه‌های بزرگ که این کار میسّر نیست، می‌توان از روش دیگری استفاده کرد. در این روش با اندازه‌گیری سطح مقطع بخش خاصی از رودخانه و سرعت متوسطِ آب عبوری از آن و حاصلضرب این دو کمیّت می‌توان میزان دبی تقریبی آب را محاسبه نمود [۸].

بررسی امکان دسترسی به نیروگاه، خصوصاً در زمستان که شرایط جوی دسترسی به محیط‌ها کوهستانی را سخت‌تر می‌کند نیز مسأله مهمی است که توجه به آن برای یافتن ساخت‌گاه‌های بالقوه ضروری است. امکان احداث کانال و تونل تحت فشار و عدم تداخل با سایر طرح‌های توسعه معیارهای دیگری هستند که لازم است برای جست‌وجو و امکان سنجی نصب این نیروگاه‌ها مورد توجه قرار گیرند [۵].

به طور کلی هزینه‌ی بهره‌برداریِ کم در کنار سازگاری با طبیعت دو مزیت برجسته‌ی نیروگاه‌های برقآبی کوچک نسبت به نیروگاه‌های برقآبی سنتی است که استفاده از آن را توجیه‌پذیر و جذاب کرده‌است [۸]. از این رو انجام تحلیل‌های اقتصادی قبل از احداث نیروگاه به منظور احراز اطمینان از سودآوریِ هرچه بیشتر آن ضروری است. تحلیل اقتصادی نیروگاه‌های برقآبی کوچک شامل سه بخش است:

۱) هزینه: هزینه دو بخش سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری را شامل می‌شود. بخشی از هزینه‌های سرمایه‌گذاری مانند هزینه‌های فنی و احداث خطوط توزیع، هزینه‌های مستقیم و برخی دیگر مانند هزینه‌های مهندسی هزینه‌های غیرمستقیم پروژه هستند. هزینه‌های بهره‌برداری شامل مواردی از قبیل هزینه‌های تعمیر و نگهداری، هزینه‌های ساختمان‌های اداری، هزینه‌های بهره‌برداری از خطوط توزیع و ... هستند [۸]. هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری از نیروگاه‌های برقآبی کوچک در شکل ۷ نشان داده‌شده‌است.

۲) سود: سود را می‌توان به صورت روزانه، ماهانه و یا سالانه محاسبه کرد که حاصل تولید توان و فروش آن است. به عنوان یک فاکتور تعیین‌کننده برای امکان‌پذیر بودن یا نبودن سرمایه‌گذاری می‌توان از آنالیز سود-هزینه استفاده کرد. آنالیز سود-هزینه، شناسایی، اندازه‌گیری و مقایسه‌ی سود و هزینه‌ی یک پروژه پژوهشی است. با استفاده از نرخ سود و هزینه[1] (BCR)، می‌توان طرح‌های برنامه‌ریزی را در اولویت‌های مختلف مرتب کرد و تصمیم‌گیری اجرای



شکل ۷ انواع هزینه‌ها برای احداث نیروگاه‌های برقآبی کوچک.

1. Benefit and Cost Rates

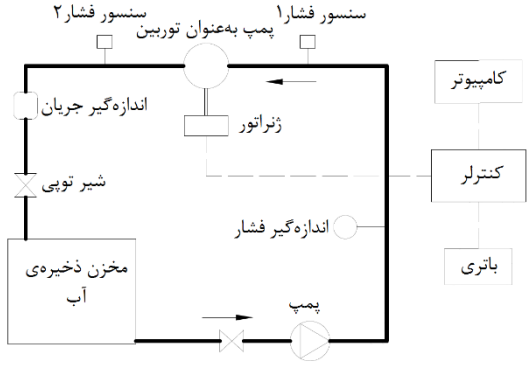
پروژه را بر مبنای این اولویت‌ها انجام داد. در صورتی که BCR مساوی یا بزرگتر از یک باشد، سرمایه‌گذاری ممکن و در حالتی که BCR کمتر باشد، سرمایه‌گذاری ناممکن است [۸، ۱۴].

۳)دوره بازگشت: با تجزیه و تحلیل سود و هزینه می‌توان مدت‌زمان بازگشت سرمایه را محاسبه کرد. به عبارتی طول دوره‌ی زمانی که در آن تمامی هزینه‌های صرف‌شده برای احداث و بهره‌برداری از نیروگاه در قالب سود برمی‌گردد، دوره بازگشت سرمایه نام دارد. در صورتی که این مدت‌زمان کمتر از مدت‌زمان سرمایه‌گذاری باشد، سرمایه‌گذاری ممکن و سودآور است [۸].

۵- نصب نیروگاه‌های آبی کوچک روی شبکه‌ی آب‌رسانی

همان گونه که بیان شده نیروگاه‌های آبی کوچک غالباً روی رودخانه‌ها و در مسیر رودخانه نصب می‌شوند. رویکرد مناسبِ دیگر برای استفاده از این نیروگاه‌ها احداث آنها روی شبکه آب‌رسانی است. پژوهش‌های قابل قبولی در این حوزه انجام شده که نشان می‌دهد امکان بالقوه‌ای در شبکه آب‌رسانی، خصوصاً در کلان‌شهرهایی مانند تهران، که اختلاف ارتفاع زیادی در نقاط مختلف شبکه دارند، وجود دارد. یکی از مشکلات اصلی شبکه‌ی آب‌رسانی افزایش بیش از اندازه‌ی فشار آب در نقاط خاصی از شبکه است که به دلیل وسعت شبکه و اختلاف ارتفاع نامطلوب پدید می‌آید. ایجاد تنش‌های هیدرولیکی مانا و ایستا در منبع تغذیه‌ی آب و سیستم توزیع از عواقب این افزایش فشار است. شیرهای تنظیم فشار، مخازن آب و تجهیزات هیدروپنوماتیک از راهکارهای در حال استفاده برای تنظیم فشار هستند [۱۵]. اختلاف ارتفاع در بخش‌هایی از شبکه آبرسانیِ کلان‌شهر تهران به بیش از ۲۰۰ متر می‌رسد. در حال حاضر، انرژی پتانسیل ناشی از این اختلاف ارتفاع به راحتی توسط شیرهای فشارشکن در نقاط خاصی از شبکه که دارای فشار بالا هستند، هدر می‌رود. این در حالی است که استفاده از این شیرهای فشارشکن هزینه‌های تعمیر و نگه‌داری زیادی را نیز به بهره‌بردار تحمیل می‌کند. مطالعه‌ی انجام شده در [۱۶] به امکان‌سنجی نصب نیروگاه‌های آبی کوچک روی شبکه آبرسانی کلان‌شهر تهران پرداخته‌است. در این پژوهش نصب نیروگاه آبی کوچک در ۱۲ مورد از این نقاط مورد بررسی قرار گرفته‌است. نتایج بدست آمده تأیید می‌کند که امکان بهره‌برداری حدود ۱۹۸ تا ۱۲۳۵ مگاوات برق از محل این انرژیِ نطلبیده وجود دارد. با مطالعه‌ی بیشتر روی شبکه‌های آبرسانی در سایر شهرهای ایران می‌توان ظرفیت‌های بالقوه تولید برق از شبکه آبرسانی را روشن‌تر محاسبه کرد.

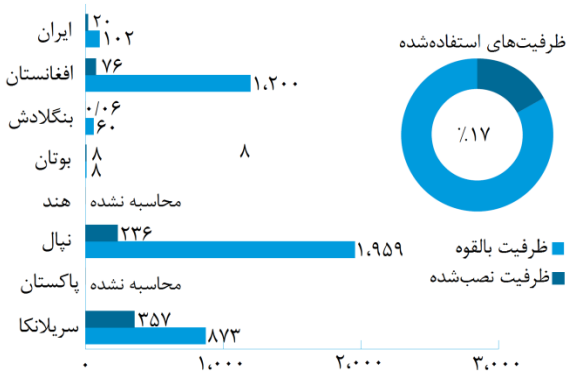
رشد ساختمان‌های بلند در کلان‌شهرها منجر به ایجاد چالشی دیگر از همین نوع در حوزه آبرسانی شده‌است. با توجه به ارتفاع زیاد این ساختمان‌ها فشار آب شهری برای تامین آب طبقه‌های بالایی مناسب نیست. از این رو نیاز است که از یک پمپ آب برای هدایت آب به منبع پشت بام استفاده گردد. سپس آب از منبع به داخل واحدها توزیع می‌شود. به جهت جلوگیری از ایجاد خسارت در پمپ و اتصالات مربوط به آن لازم است فشار آب قبل از ورود به پمپ گرفته شود. برای این منظور از شیرهای کنترل فشار استفاده می گردد. از دیدگاه تبدیل چالش به فرصت، مرجع [۱۷] احداث نیروگاه‌های آبی کوچک را در ورودی شبکه توزیع آب به داخل ساختمان بررسی کرده است. می‌توان به جای شیرهای کنترل فشار از مجموعه‌ی توربین آبی کوچک و ژنراتور استفاده کرد تا به جای هدر رفت فشار آب، از آن برق تولید نمود. استفاده از پمپ به عنوان توربین در این مرجع پیشنهاد شده‌است. هزینه‌ی راه اندازی کم، نصب و نگه‌داری آسان و موجود بودن در بازار از مزایای این نوع توربین است. سیستم مورد استفاده در شکل ۸ آمده است.



شکل ۸ مدار هیدرولیکی مورد استفاده به منظور تولید برق از فشار آب در ساختمان‌های بلند[۱۷].

۶- اقدامات انجام‌شده در ایران

تا اوایل سال ۲۰۱۹، در کشورمان ایران ۱۹/۵ مگاوات انرژی برقآبی کوچک نصب شده موجود بوده که نسبت به ۲۰۱۶، ۱۹درصد افزایش داشته است. هنوز ۱۰۲/۵ مگاوات ظرفیت بالقوه برای نصب وجود دارد و حدود ۸۳ مگاوات پتانسیل های توسعه‌نیافته [۷] تخمین زده می‌شود. در شکل ۹ می‌توان این دو مقدار را با چند کشور جنوب آسیا مقایسه کرد.



شکل ۹ ظرفیت‌های بالقوه و نصب‌شده نیروگاه‌های آبی کوچک کمتر از ۱۰ مگاوات در کشورهای جنوب آسیا [۷].

نیروگاه‌های جریانی به دلیل کوتاهی زمانِ ساخت، مشکلات اجتماعی و زیست‌محیطی کمتر، توجیه اقتصادی بالا، پراکندگی مناسب در سطح کشور، داشتن بستر مناسب جهت انتقال تکنولوژی و قابلیّت سرمایه‌گذاری بخش خصوصی در آنها از جذابیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشند؛ از این رو مورد حمایت بیشتری قرار می‌گیرند و پروژه‌های در حال بهره‌برداری و در حال ساخت غالباً از این نوع نیروگاه‌ها هستند [۱۸]. براساس جدیدترین گزارش، میزان انرژی برقآبی کوچک نصب شده در ایران به صورت جدول ۳ است. طبق این جدول مجموعاً ۲۰/۱ مگاوات ظرفیت آماده اجرا و واگذارشده وجود دارد که در صورت اجرایی شدن افزایش حدود ۱۰۰ درصدی تولیدات برقآبی کوچک را محقّق خواهدکرد.

توجه به این نکته ضروری است که در همه کشورها چه توسعه‌یافته و چه درحال توسعه اطلاعات روشن و به‌روز در مورد پتانسیل‌های موجود وجود ندارد و اطلاعات موجود بیشتر بر اساس چارچوب‌های سیاست‌گذاری فعلی، پیشرفت‌های فن‌آوری و پتانسیل‌های ناشی از احیای اماکن قدیمی یا توسعه‌ی آب‌راه‌ها و سدهای موجود استخراج می‌شود [۷]. حل چالش‌های مدیریتی، فنی، اجتماعی و زیست‌محیطی که در سطور فوق اشاره شد، گام نخست جهت تحقّق ظرفیت‌های بالقوه و توسعه‌ی پتانسیل‌های موجود

محسوب می‌شود. لذا می‌توان گفت که آینده‌ی برقآبی‌های کوچک نیازمند وضع قوانین مناسب و سیاست‌های تشویقی است.

جدول ۳ پروژه‌های برقآبی کوچک در ایران [۱۸]

نام پروژه	ظرفیت (مگاوات)	اندازه نیروگاه	وضعیت پروژه
نیروگاه شهید طالبی	۲/۲۵	کوچک	در حال بهره‌برداری
نیروگاه شهید عظیمی	۱	کوچک	در حال بهره‌برداری
نیروگاه دره‌تخت ۱	۰/۶۸	مینی	در حال بهره‌برداری
نیروگاه دره‌تخت ۲	۰/۹	مینی	در حال بهره‌برداری
نیروگاه ارده	۰/۱۲۵	میکرو	در حال بهره‌برداری
نیروگاه سررود	۰/۰۶۵	میکرو	در حال بهره‌برداری
نیروگاه‌های میکرو	۰/۲۲۷	میکرو	در حال بهره‌برداری
نیروگاه پیران	۸/۴	کوچک	در حال بهره‌برداری
نیروگاه تاریک	۳	کوچک	در حال بهره‌برداری
پروژه‌های توسعه یاسوج	۲/۶	کوچک	واگذارشده
نیروگاه سد تنظیمی زاینده‌رود	۸/۵	کوچک	آماده اجرا
نیروگاه پیچاب	۴	کوچک	واگذارشده
نیروگاه چوبخال	۵	کوچک	واگذارشده
سوله دوکل	۴/۴	کوچک	اجرایی

۷- جمع‌بندی

تنوع منابع انرژی تجدیدپذیر و نیز شرایط مختلف جغرافیایی و زیرساخت‌های متناسب با آن، سیاست‌های مدیریتی و بهره‌برداری گوناگونی را می‌طلبد. جریان آب رودخانه‌های کوچک، یکی از این منابع انرژی است که استفاده از آن توسط نیروگاه‌های برقآبی کوچک میسّر است. ظرفیت‌های قابل قبولی از این نیروگاه‌ها در بسیاری از نقاط جهان علی‌الخصوص کشورهای در حال توسعه وجود دارد. این نیروگاه‌ها بر خلاف نیروگاه‌های برقآبی سنتی نیازی به احداث سد ندارند که نتیجه‌ی آن کاهش هزینه‌های احداث نیروگاه، افزایش بهره‌وری و همچنین حذف اثرات نامطلوب زیست‌محیطی است. خوشبختانه در سال‌های اخیر فن‌آوری استفاده از این نیروگاه‌ها در سایه‌ی پژوهش‌ها و کارهای عملیِ انجام‌شده، به تکامل رسیده و از لحاظ فنی کاملاً توجیه‌پذیر است.

احداث نیروگاه‌های برقآبی کوچک به روش‌های مختلفی ممکن است. در رایج‌ترین آن‌ها با تغییر مسیر جریان رودخانه فرازه‌ی آب را افزایش داده و در مسیر آن توربین را قرار می‌دهند. با توجه به تنوع در فرازه‌ی نیروگاه‌ها و دبی تخلیه آن‌ها، انواع مختلفی از توربین‌ها برای این منظور مورد استفاده قرار می‌گیرند. همچنین استفاده از هر دو نوع ژنراتور سنکرون و آسنکرون در این نیروگاه‌ها معمول است.

با وجود چالش‌های پیش‌رو، هم‌اکنون کشورهای زیادی در حال بهره‌برداری از این نیروگاه‌ها هستند و حتی برنامه‌ریزی‌های بلندمدتی برای توسعه‌ی این نیروگاه‌ها در دستور کار خود دارند. کشور ایران یکی از این کشورهاست که تا کنون توانسته‌است تا حدود ۲۰ مگاوات از این منابع بهره‌برداری کند و به همین مقدار نیروگاه‌های واگذارشده و در حال اجرا دارد. مطالعات نشان می‌دهد که حدود ۱۰۰ مگاوات ظرفیت بالقوه برای نصب این نیروگاه‌ها در کشور وجود دارد. این در حالی است که با انجام مطالعات میدانی، کشف ظرفیت‌های بیشتر نیز امکان‌پذیر است. این موضوع می‌تواند در پژوهش‌های آینده مورد بررسی قرار گیرد.

تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد که استفاده از این فن‌آوری روی شبکه آبرسانی در کلان‌شهرهای ایران نیز قابل اجراست. چالش فنیِ اختلاف ارتفاع در مسیرهای طولانی در شبکه آبرسانی که منجر به افزایش فشار در برخی از نقاط شبکه می‌شود، از این دیدگاه به فرصت تبدیل شده‌است. با نصب نیروگاه‌های برقآبی کوچک در محل فشارشکن‌ها که به طور معمول در شبکه‌ی آبرسانی استفاده می‌شوند، می‌توان انرژی ناشی از فشار رها شده را که پیش از این بلااستفاده بوده، به انرژی الکتریکی تبدیل کرد.

براساس گزارش‌ها، در حال حاضر موانع اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی زیادی سر راه احداث و بهره‌برداری این نیروگاه‌ها وجود دارد که تحقق ظرفیت‌های بالقوه آنها در ایران و جهان را تحت‌الشعاع قرار داده است. افزایش تمرکز سیاسی روی این نیروگاه‌ها، فراهم ساختن پشتیبانی‌های مالی، وضع قوانین اداری ساده‌تر و بهبود تکنولوژی‌ها و مهارت‌های محلی از راهکارهای مناسب برای رفع موانع فوق است. به طور کلی آینده نیروگاه‌های برقآبی کوچک، ضمن کارهای پژوهشی و اجرایی، به قوانین و سیاست‌های انگیزشی وضع‌شده نیز وابسته است.

۸- مراجع

[1] A. Haghighi and A. Babapoor, Using of renewables energies such as effective way to reduce environmental pollution, *Journal of Renewable and New Energy*, Vol. 5, No. 1, pp. 41-51, 2018. (in Persian)

[2] R. Pourdarbani, Review of Current Status and Future Demand for Renewable Energy in Iran and its Marketing, *Journal of Renewable and New Energy*, Vol. 7, No. 1, pp. 118-124, 2020. (in Persian)

[3] F. Appavou et al, *Renewables: Global status report*, REN21 Secretariat, Paris, France, 2019.

[4] H. Jangavar, Y. Noorollahi and A. Emami Meybodi, Economic and Environmental Analysis of the Small Hydropower Plants Development, *Iranian Journal of Ecohydrology*, Vol. 4, No. 4, pp. 1255-1268, 2018. (in Persian)

[5] N. Haji Ghafouri Bukani, Investigation of small hydropower plants in Iran and some countries of the world, *Journal of Iranian Association of Mechanical Engineers*, Vol. 24, No. 4, pp. 36-46, 2015. (in Persian)

[6] W. Ali, H. Farooq, A. U. Rehman, M. Jamil, Q. Awais and M. Ali, Grid Interconnection of Micro Hydro Power Plants: Major Requirements, Key Issues and Challenges, *International Symposium on Recent Advances in Electrical Engineering (RAEE)*, Islamabad, Pakistan, pp. 1-6, 2018.

[7] D. Liu, H. Liu, X. Wang, and E. Kremere, eds. *World Small Hydropower Development Report*, WSHPDR, United Nations Industrial Development Organization; International Center on Small Hydro Power, 2019.

[8] Y. Rombe Pasalli, A. Beni Rehiara, Design Planning of Micro-hydro Power Plant in Hink River, *Procedia Environmental Sciences*, Vol. 20, pp. 55-63, 2014.

[9] Jawahar, C. and Michael, Prawin. (2017), A review on turbines for micro hydro power plant, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. vol. 72, pp. 882-887, 2017.
[10] Netra Pd. Gyawali, Universal Electronic Load Controller for Microhydro Power Plant, *12th IEEE International Conference on Control & Automation (ICCA) Kathmandu*, Nepal, pp. 288-292, 2016.
[11] Z. Goryca, S. Różowicz, K. Dąbała and Z. Krzemień, Design and tests of generators for micro hydro plants, *2017 International Symposium on Electrical Machines (SME*), Naleczow, pp. 1-4, 2017.
[12] *Micro power systems*, Accessed 5 October 2020, https://www.energy.gov/energysaver/buying-and-making-electricity/microhydropower-systems.
[13] U. F. Melkior, J. Tlustý and Z. Müller, Micro hydro power for off grid electrification: A case study of hhaynu river - Mbulu, Tanzania*, 2018 19th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*, Brno, pp. 1-5, 2018.
[14] A. Zangeneh, S. Jadid and A. Rahimi-Kian, Normal boundary intersection and benefit–cost ratio for distributed generation planning, *European transactions on electrical power*, Vol. 20, pp. 97–113, 2010.
[15] O. A. Koya and T. L. Oladosu, Hydro power potentials of water distribution networks in public universities: A case study, *Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies*, Issue 30, pp. 287-298, 2017.
[16] A. Mohammadi and M. Vashtani, Feasibility study of installing small hydropower plants on the water supply network lines of Tehran, *Applied Mechanics Research*, Vol. 7, No. 3, 2016. (in Persian)
[17] J. Du, H. Yang, Z. Shen and J. Chen, Micro hydro power generation from water supply system in high rise buildings using pump as turbines, *Energy (2017)*, Vol. 137, pp. 431-440, 2017.
[18] *Iran water & power Resources Development Company (1399)*, Accessed 3 septambr 2020, http://en.iwpco.ir.