سال دوم، شماره اول، تابستان ۱۳۹۴، ص ص ۴۶- ۵۱
فصل‌نامه علمی – ترویجی انرژی‌های تجدیدپذیر و نو
renemag.ir
مقاله کامل
تاریخ دریافت: ۹۴/۰۵/۰۱
تاریخ پذیرش: ۹۴/۰۶/۳۱

بررسی انرژی برقابی با اختلاف ارتفاع ریزش کم آب در کشورهای آمریکا و کانادا

حامد امیری مقدم[1*]، پیمان تقی‌پور [2]

۱- کارشناس مهندسی مکانیک، دفتر تحقیق و فناوری‌های نو، سازمان انرژی‌های نو ایران (سانا)، تهران
۲- کارشناس ارشد مهندسی برق، دفتر انرژی و برق روستایی (فتوولتائیک)، سازمان انرژی‌های نو ایران (سانا)، تهران
* تهران، صندوق پستی ۱۴۶۸۶۱۱۳۸۷، amiri.m.hamed@gmail.com

چکیده

امروزه انرژی برقابی نقش مهمی در تولید برق تجدیدپذیر در جهان دارد. به علت بهره‌برداری از اکثر پتانسیل‌های برقابی بزرگ در دهه‌های گذشته و با توجه مشکلات ایجاد شده ناشی از احداث سدهای بزرگ، امروزه بسیاری از کشورهای جهان به استفاده از پتانسیل انرژی برقابی کوچک و میکرو و همچنین سرمایه‌گذاری در این حوزه روی آورده‌اند. نیروگاه‌های آبی میکرو با اختلاف ارتفاع ریزش کم آب یکی از این پتانسیل‌های برقابی کوچک است که در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است. در این تحقیق انرژی برقابی میکرو با ارتفاع (هد) کم در دو کشور آمریکا و کانادا از لحاظ پتانسیل‌های موجود، بودجه اختصاص داده شده، سیاست‌های تشویقی و آنالیزهای اقتصادی بررسی شده است. در کشور آمریکا حدود ۶۷ GW پتانسیل تئوری برقابی با هد کم شناسایی شده است که این کشور قصد دارد تا پایان سال ۲۰۳۰ از ۳۰ گیگاوات این پتانسیل‌ها بهره‌برداری کند. برای این منظور در سال‌های اخیر این کشور بیش از ۱۴٪ از بودجه تحقیق و توسعه انرژی برقابی را به گسترش این‌گونه پتانسیل‌ها اختصاص داده است. در کشور کانادا نیز ۵ گیگاوات پتانسیل تئوری انرژی برقابی با اختلاف ارتفاع کم شناسایی شده است. علی‌رغم هزینه‌ی اولیه بالای احداث نیروگاه‌های آبی با ارتفاع کم، هزینه تمام شده در واحد کل انرژی الکتریکی تولیدی با توجه به بالا بودن عمر مفید و ضریب ظرفیت این‌گونه نیروگاه‌ها، از برخی از نیروگاه‌های انرژی‌های تجدیدپذیر مانند فتوولتائیک، زیست‌توده و نیروگاه حرارتی خورشیدی کمتر تخمین زده می‌شود. بنابراین برای گسترش هرچه بیشتر این نیروگاه‌ها باید سیاست‌های تشویقی مناسبی در نظر گرفته شود.

کلید واژگان: انرژی برقابی، اختلاف ریزش کم آب، انرژی تجدیدپذیر

An investigation on low head hydropower in United State and Canada

Hamed Amiri Moghadam[1*], Peyman Taghipour[2]

1- New Energies Research and Technology Office, Renewable Energy Organization of Iran (SUNA), Tehran, Iran
2- Rural Electricity & Energy Office (Photovoltaic), Renewable Energy Organization of Iran (SUNA), Tehran, Iran
* P.O.B. 1468611387, Tehran, Iran, amiri.m.hamed@gmail.com
Received: 23 July 2015 Accepted: 22 September 2015

Abstract

Hydropower plays a significant role in renewable electricity production. Nowadays many countries are planning to develop small and micro hydropower because of environmental issues caused by developing large scale hydro powers. Low head hydro powers are among renewable sources of energy which attracts a lot of attention in last years. In this paper low head hydropower in United State and Canada has been investigated in terms of available potentials, allocated funds, incentive policies and economic analyses. There are about 67 GW theoretical low head hydropower potentials in United States which government is planning to exploit 30 GW of these potentials until 2030. To reach this goal, US government has allocated 14% of hydropower research and development's fund to this area in last recent years. In Canada 5 GW theoretical low head potentials have identified. Although capital cost of low head hydropower is higher than other renewable energy, but due to longer lifetime and higher capacity factor, overall cost in unit of generated energy is lower than some renewable energy including photovoltaic, solar thermal energy and biomass. Therefore low head hydropower needs appropriate incentive policy for higher deployment.

Keywords: Hydropower, Low Head, Renewable Energy

۱- مقدمه

استفاده از انرژی آب به عنوان یک منبع انرژی پاک، ارزان و قابل دسترس همواره مطرح بوده است. در حال حاضر نیز انرژی برقابی بخش مهمی از تولید برق در جهان را به خود اختصاص داده است. بر اساس آمار منتشر شده توسط شورای جهانی انرژی در سال ۲۰۱۳، انرژی برقابی حدود ٪۱۶/۴ از کل برق تولید شده در جهان را تشکیل می‌دهد [۱]. بر اساس این گزارش سهم انرژی برقابی در تولید برق حاصل از منابع تجدیدپذیر ٪۷۶ می‌باشد.

برای طبقه‌بندی نیروگاه‌های آبی روش‌های مختلفی وجود دارد. یکی از این روش‌ها، دسته‌بندی بر اساس میزان ظرفیت نیروگاه می‌باشد. هرچند که استاندارد واحد قابل قبولی به منظور طبقه‌بندی نیروگاه‌های آبی بر حسب توان در جهان وجود ندارد، اما در بسیاری از کشورها نیروگاه‌های آبی را بر اساس جدول ۱ طبقه‌بندی می‌کنند [۲].

جدول ۱: تقسیم‌بندی نیروگاه‌های آبی بر حسب توان تولیدی **[۲]**

نوع نیروگاه آبی	محدوده توان تولیدی
بزرگ	بیشتر از ۱۰۰ MW
متوسط	۲۰ - ۱۰۰ MW
کوچک	۱ - ۲۰ MW
مینی	۱۰۰ - ۱۰۰۰ kW
میکرو	۵ - ۱۰۰ kW
پیکو	کم تر از ۵ kW

دسته‌بندی بر اساس اختلاف ریزش آب یکی دیگر از روش‌های طبقه‌بندی نیروگاه‌های آبی می‌باشد. این طبقه‌بندی نیز در کشورهای مختلف متفاوت می‌باشد. در جدول ۲ یک نمونه طبقه‌بندی نیروگاه‌های آبی را بر اساس اختلاف ریزش آب را نشان می‌دهد [۳].

جدول ۲: طبقه‌بندی نیروگاه‌های آبی بر اساس اختلاف ریزش آب **[۳]**

نوع نیروگاه آبی	اختلاف ریزش آب
نیروگاه آبی با هد بسیار کم	۲ - ۵ m
نیروگاه آبی با هد کم	۵ - ۱۵ m
نیروگاه آبی با هد متوسط	۱۵ - ۱۵۰ m
نیروگاه آبی با هد زیاد	بیش‌تر از ۱۵۰ متر

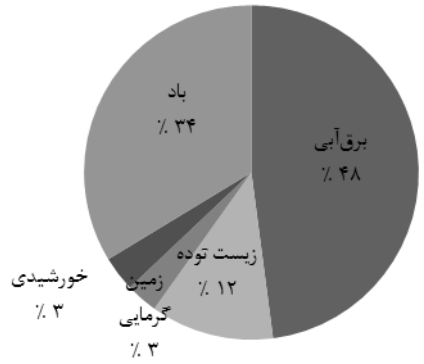
امروزه در بسیاری از کشورهای جهان پتانسیل‌های برقابی بزرگ و متوسط مورد بهره‌برداری قرار گرفته‌اند. با توجه به مشکلات ایجاد شده ناشی از احداث این‌گونه نیروگاه‌های بزرگ، در سال‌های گذشته کشورهای مختلفی در جهان در زمینه بهره‌برداری از پتانسیل‌های برقابی کوچک و میکرو سرمایه‌گذاری کرده‌اند. پتانسیل برقابی میکرو با اختلاف ریزش کم و بسیار کم آب یکی از این‌گونه پتانسیل‌های برقابی میکرو است که در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است. بهره‌برداری از این‌گونه پتانسیل‌های برقابی در توسعه مناطق روستایی و دور افتاده، تولید برق به صورت پراکنده و افزایش سهم انرژی‌های تجدیدپذیر در تولید برق نقش مهمی دارد. به طور کلی در رودخانه‌ها، کانال‌های آبیاری، مزارع پرورش آبزیان، لوله‌های انتقال آب و سدهای مخزنی که هدف آن‌ها تولید انرژی برقابی نیست، قابلیت احداث نیروگاه‌های آبی میکرو با اختلاف ریزش کم آب را دارند.

در این تحقیق انرژی برقابی با اختلاف ریزش کم آب در دو کشور آمریکا و کانادا بررسی شده است.

۲- انرژی برقابی در کشور آمریکا

کشور آمریکا با مساحت ۹،۸۴۲،۰۰۰،۰۰۰ کیلومتر مربع و با جمعیت ۳۲۰ میلیون نفری، سومین کشور پرجمعیت جهان محسوب می‌شود. بر اساس آمار منتشر شده در سال ۲۰۱۰ آمریکا بعد از کشور چین دومین مصرف کننده انرژی از لحاظ میزان مصرف کلی انرژی در جهان است. در سال ۲۰۱۴ حدود ٪۶۷ از کل انرژی الکتریکی تولید شده در کشور آمریکا از سوخت‌های فسیلی، ٪۲۰ از انرژی هسته‌ای و ٪۱۳ از انرژی‌های تجدیدپذیر تأمین شده است [۴]. سهم انواع انرژی‌های تجدیدپذیر در تولید برق کشور آمریکا در سال ۲۰۱۴ میلادی در نمودار ۱ آورده شده است.

همان طور که نمودار ۱ مشاهده می‌شود، در کشور آمریکا انرژی برقابی با سهم ۴۸ درصدی نقش مهمی در تولید برق تجدیدپذیر دارد. در واقع کشور آمریکا بعد از کشورهای چین، کانادا و برزیل بزرگترین کشور تولید کننده انرژی برقابی در جهان می‌باشد. بر اساس آمار منتشر شده در سال ۲۰۱۴، انرژی برقابی با تولید سالانه kWh $۱۰^{۱۱}\times$ ۲/۶، حدود ٪۶/۳ از کل برق تولیدی در این کشور را به خود اختصاص داده است [۴].



نمودار ۱: سهم انرژی‌های تجدیدپذیر در برق تولیدی کشور آمریکا در سال ۲۰۱۴ [۴]

۲-۱- انرژی برقابی با اختلاف ارتفاع کم در کشور آمریکا

با توجه به نقش مهم انرژی برقابی در تولید برق تجدیدپذیر و لزوم استفاده از تمامی پتانسیل‌های انرژی‌های تجدیدپذیر، وزارت انرژی کشور آمریکا از سال ۲۰۰۰ میلادی برنامه‌ریزی برای بهره‌برداری از پتانسیل برقابی با اختلاف ارتفاع کم (کمتر از ۹ متر) را آغاز کرده است. براساس گزارش منتشر شده در سال ۲۰۰۴ توسط وزارت انرژی آمریکا، پتانسیل انرژی برقابی با اختلاف ارتفاع کم در این کشور از لحاظ تئوری حدود ۱۴۰ گیگاوات می‌باشد که تنها ۳/۲ گیگاوات از این پتانسیل مورد بهره‌برداری قرار گرفته است [۵]. بر اساس این گزارش که بر مبنای سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) و در ۲۰ منطقه هیدرولوژیکی کشور آمریکا انجام شده است، پتانسیل‌های تئوری نیروگاه‌های برقابی با هد کم شناسایی شده‌اند. در جدول ۳ نتایج این گزارش به صورت خلاصه آورده شده است. در این جدول توان کم و هد کم به ترتیب معادل توان کمتر از ۱ MW و هد کمتر از ۹ متر می‌باشد.

جدول ۳: پتانسیل تئوری انرژی برقابی در کشور آمریکا [۵]

توان و هد	ظرفیت بهره‌برداری شده (GW)	پتانسیل‌های حذف شده (GW)	پتانسیل‌های موجود (GW)
توان زیاد- هد زیاد	۶۶/۸	۱۱۰/۹	۱۳۷/۷
توان زیاد- هد کم	۲/۳	۴۲/۸	۹۸/۹
توان کم- هد زیاد	۰/۷	۱۸/۳	۵۱/۷
توان کم- هد کم	۰/۹	۵/۴	۴۲/۷
مجموع	۷۰/۸	۱۷۷/۵	۳۳۱/۱

در گزارش منتشر شده در سال ۲۰۰۴ هیچ‌گونه امکان‌سنجی فنی و اقتصادی برای بهره‌برداری از پتانسیل‌های برقابی انجام نشده است و ظرفیت‌های ذکر شده در جدول ۳ تنها به صورت تئوری بررسی شده است. همچنین در این گزارش پتانسیل‌های برقابی با اختلاف ارتفاع کم در کانال‌های آبیاری کشاورزی و سایر آبراه‌های ساخته شده مورد بررسی قرار نگرفته است.

وزارت انرژی کشور آمریکا در سال ۲۰۰۶ پتانسیل‌های شناسایی شده در پروژه قبل را به صورت دقیق‌تر مورد بررسی قرار داد [۶]. بر اساس این گزارش تعداد ۲۴۰۰۰ سایت با اختلاف ارتفاع کم (۱/۵ m − ۶ m) و با ظرفیت کلی ۶۷ گیگاوات که در پارک‌ها و جنگل‌های ملی، مناطق نظامی و سایر مناطق ممنوعه نبودند، شناسایی شده است.

همان طور که در قبل اشاره شد در هیچ یک از پتانسیل‌سنجی‌های انجام شده، پتانسیل‌های انرژی برقابی با اختلاف ارتفاع کم در کانال‌های کشاورزی مورد بررسی قرار نگرفته است. منبع [۷] تنها گزارشی است که انرژی برقابی در کانال‌های کشاورزی را در ایالت کالیفرنیا[1] بررسی کرده است. بر اساس این گزارش پتانسیل با هد کم موجود در کانال‌های کشاورزی در ایالت کالیفرنیا حدود ۲۵۵ مگاوات تخمین زده شده است.

سدهای کوچکی که برای هدف‌های دیگری به جز تولید انرژی الکتریکی احداث شده‌اند نیز می‌تواند یکی از پتانسیل‌های انرژی برقابی با هد کم به شمار آید. در کشور آمریکا حدود ۴۲ هزار سد با ارتفاع کمتر از ۸ متر وجود دارد که تنها ۳٪ از این سدها به منظور تولید انرژی الکتریکی ساخته شده‌اند [۸]. هدف اصلی احداث این سدها تأمین آب کشاورزی، جلوگیری از سیل، مهار آتش‌سوزی و استفاده‌های تفریحی و ورزش‌های آبی بوده است. بنابراین این سدها نیز می‌تواند در تولید انرژی برقابی با اختلاف ارتفاع کم در کشور آمریکا مورد استفاده قرار گیرند.

۲-۲- سیاست‌های کشور آمریکا به منظور بهره‌برداری از پتانسیل‌های برقابی با هد کم

با توجه به آنچه که در قسمت قبل آمد، پتانسیل قابل توجهی در کشور آمریکا در زمینه انرژی برقابی با اختلاف ارتفاع کم وجود دارد. وزارت انرژی آمریکا از ۱۵ سال پیش برنامه‌ریزی برای بهره‌برداری از این پتانسیل‌های برقابی را آغاز کرده است [۵]. طبق چشم‌انداز انرژی در کشور آمریکا، این کشور قصد دارد تا پایان سال ۲۰۳۰ میلادی بیشتر از ۳۰ گیگاوات به ظرفیت نیروگاه‌های برقابی با اختلاف ارتفاع کم اضافه کند [۹]. بر اساس آمار منتشر شده از وزارت انرژی آمریکا، در سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۴ حدود ۶۲ میلیون دلار در حوزه توسعه انرژی برقابی در غالب ۳۳ پروژه سرمایه‌گذاری شده است [۱۰]. از این میزان بودجه حدود ۱۴٪ در زمینه گسترش انرژی برقابی با اختلاف ارتفاع کم تصویب شده است. در جدول ۴ به صورت خلاصه اطلاعات مربوط به این پروژه‌ها آورده شده است.

دولت آمریکا به منظور گسترش بیشتر انرژی برقابی و افزایش سرمایه‌گذاری بخش خصوصی در این حوزه سیاست‌های تشویقی مختلفی اتخاذ کرده است. از مهم‌ترین این سیاست‌های تشویقی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱- نیروگاه‌های آبی کوچک که توسط بخش خصوصی مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند مشمول قانون معافیت مالیاتی واحدهای تولیدی می‌شوند [۱۱].

۲- بخشی از کل هزینه اولیه ساخت نیروگاه آبی کوچک که توسط بخش خصوصی احداث می‌شود با توجه به شرایط نیروگاه به صورت معافیت مالیاتی و یا وام بلاعوض توسط دولت پرداخت می‌شود [۱۲].

۳- شرکت‌ها و نهادهای خصوصی در صورت سرمایه‌گذاری در احداث نیروگاه‌های آبی کوچک از وام‌های معاف از مالیات برخوردار می‌شوند [۱۲].

جدول ۴: پروژه‌های کشور آمریکا جهت گسترش انرژی برقابی با اختلاف ارتفاع کم [۱۰]

ردیف	شرح پروژه	بودجه (دلار آمریکا)
۱	امکان‌سنجی نصب توربین‌های با هد کم (VLH) بر روی رودخانه می سی سی پی[2]	۴۷۵،۷۵۰
۲	توسعه و تست توربین جدید با عملکرد در ارتفاع کم برای تولید برق در کانال‌های کشاورزی در ایالت اورگان[3]	۱،۵۰۰،۰۰۰
۳	طراحی ساخت و تست توربین با عملکرد در ارتفاع کم	۳۰۰،۰۰۰
۴	توسعه و نصب توربین با عملکرد در ارتفاع کم برای نصب در آبراه‌های نزدیک شهر برادوک[4]	۱،۵۰۰،۰۰۰
۵	تست و ارزیابی توربین با ارتفاع کم برای کانال‌های کشاورزی در ایالت اورگان	۷۴۶،۰۰۰
۶	طراحی، ساخت، تست و اعتبارسنجی توربین آبی با عملکرد در ارتفاع کم و قابلیت نصب در سدها و آبریزها	۳۰۰،۰۰۰
۷	طراحی و ساخت توربین و ژنراتور با عملکرد در ارتفاع کم توسط دانشگاه ایالت پنسیلوانیا[5]	۲،۲۰۰،۰۰۰
۸	طراحی و ساخت اولین پیچ ارشمیدس ساخت کشور آمریکا	۱،۴۹۵،۴۲۷
۹	تست و بررسی عملکرد ژنراتور با سرعت متغیر برای استفاده در نیروگاه‌های برقابی با ارتفاع کم	۵۶،۰۰۰
۱۰	مجموع	۸،۵۷۳،۱۷۷

۲-۳- بررسی اقتصادی نیروگاه‌های آبی با هد کم در کشور آمریکا

توان تولیدی یک نیروگاه آبی از رابطه (۱) $P = \eta \rho g h Q$ به دست می‌آید که در این رابطه P توان تولیدی، η بازده کلی نیروگاه، h

[1] California

[2] Mississippi River
[3] Oregon
[4] Braddock
[5] Pennsylvania

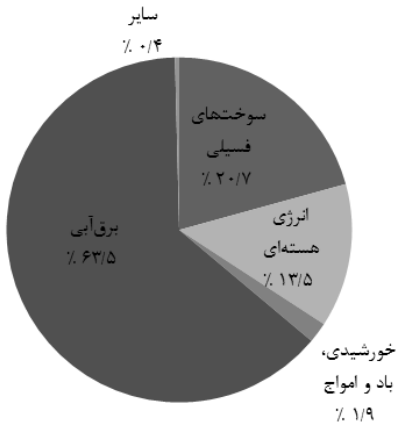
اختلاف ارتفاع آب در دو سمت توربین و Q دبی آب عبوری از توربین می‌باشد. طبق رابطه ۱ در یک نیروگاه آبی برای تولید توان ثابت، با کم شدن اختلاف ارتفاع آب، دبی عبوری باید افزایش یابد. بنابراین برای تولید انرژی الکتریکی قابل توجه در نیروگاه‌های آبی با هد کم ، دبی آب عبوری از توربین باید زیاد باشد. این امر باعث افزایش هزینه ساخت نیروگاه‌ها آبی با هد کم نسبت به نیروگاه‌های آبی متداول در واحد توان تولیدی می‌شود. در جدول ۵ تخمین هزینه اولیه چند پتانسیل برقابی در کشور آمریکا با یکدیگر مقایسه شده است.

جدول ۵: تخمین هزینه اولیه چند نیروگاه آبی با هدهای مختلف در ایالات کالیفرنیا در سال ۲۰۰۴ [۷]

اختلاف ریزش آب	هد (m)	دبی (m^3/s)	توان تولیدی (kW)	هزینه اولیه (دلار/kW)
خیلی کم	۲/۱	۸/۱	۱۰۱	۸،۵۷۴
	۵/۷	۲۲/۸	۱۰۰۲	۲،۰۹۸
کم	۹/۷	۱۴/۱	۱۰۶۸	۱،۳۰۹
	۱۳/۴	۹/۴	۱۰۰۳	۱،۰۹۲
	۲۲	۷/۱	۱۰۶۶	۱،۱۲۴
متوسط	۳۰/۴	۴/۵	۱۰۰۴	۹۹۹

۳- انرژی برقابی در کشور کانادا

کشور کانادا با مساحت نزدیک به ده میلیون کیلومتر مربع و جمعیتی در حدود ۳۵ میلیون نفر در سال ۲۰۱۳ دومین کشور پهناور جهان و پنجمین کشور در تولید انرژی است. کانادا یکی از کشورهای جهان است که بخش اعظم انرژی الکتریکی خود را از طریق انرژی برقابی تأمین می‌کند. در واقع کشور کانادا دومین کشور تولید کننده انرژی برقابی در جهان بعد از چین می‌باشد. بر اساس آمار منتشر شده توسط دولت کانادا، این کشور در سال ۲۰۱۳ میلادی با تولید TWh ۳۸۸ حدود ۶۳٪ از برق تولیدی را از طریق نیروگاه‌های آبی تأمین کرده است [۱۳]. در نمودار ۲ سهم سایر منابع در تولید انرژی الکتریکی کشور کانادا آورده شده است.



نمودار ۲: سهم منابع مختلف در تولید انرژی الکتریکی کشور کانادا در سال ۲۰۱۳ [۱۳]

۳-۱- انرژی برقابی با اختلاف ارتفاع کم در کشور کانادا

کشور کانادا یکی از بزرگترین تولید کننده‌های انرژی برقابی در جهان با ظرفیت نصب شده بیش ازGW ۷۲ می‌باشد. بر اساس آمار سال ۲۰۰۶ ظرفیت نیروگاه‌های آبی کوچک در کشور کانادا حدود MW ۳۵۰۰ می‌باشد که حدود MW ۵۶۰ آن را نیروگاه‌های آبی با اختلاف ارتفاع کم (کمتر از ۱۵ متر) تشکیل می‌دهد [۱۴]. جدول ۶ تعداد سایت‌ها و ظرفیت نیروگاه‌های آبی کوچک و با هد کم بهره‌برداری شده در کشور کانادا را در سال ۲۰۰۶ نشان می‌دهد.

جدول ۶: ظرفیت نیروگاه‌های برقابی کوچک و با اختلاف ارتفاع کم بهره‌برداری شده کشور کانادا در سال ۲۰۰۶ [۱۴]

نوع نیروگاه آبی	تعداد سایت‌های بهره‌برداری شده	ظرفیت سایت‌های بهره‌برداری شده (MW)
برقابی کوچک	۳۵۹	۳۴۲۲
برقابی با اختلاف ارتفاع کم	۹۹	۵۶۰

به طور کلی در بیشتر سایت‌های برقابی بزرگ کشور کانادا، نیروگاه آبی احداث شده است و یا در حال ساخت می‌باشد. همچنین از بسیاری از پتانسیل‌های برقابی کوچک که در نزدیکی شهرها و بارهای محلی بوده‌اند نیز بهره‌برداری شده است. از سایر پتانسیل‌های برقابی کوچک به علت توان تولیدی کم، فصلی بودن توان تولیدی، هزینه اولیه بیشتر، دور بودن از شبکه سراسری و مصرف‌کنندگان نهایی تاکنون بهره‌برداری نشده است. در کشور کانادا در سال‌های اخیر علی رغم همه مشکلات ذکر شده، به علت کم بودن اثرات زیست محیطی، تولید انرژی الکتریکی به صورت پراکنده و نقش مهم در توسعه مناطق دور افتاده این‌گونه پتانسیل‌های برقابی میکرو مورد توجه قرار گرفته‌اند.

بر اساس گزارش منتشر شده توسط سازمان منابع طبیعی کانادا و با مطالعه پتانسیل‌سنجی‌های انجام گرفته، حدود ۲۳۰۰ سایت برقابی با اختلاف ارتفاع کم (کمتر از ۱۵ متر) با ظرفیت تئوری GW ۵ در کشور کانادا شناسایی شده است. با بررسی‌های انجام شده، حدود GW ۱/۳ از این پتانسیل‌های تئوری برای احداث نیروگاه‌های آبی با هد کم مناسب تشخیص داده شده است. همچنین در کشور کانادا حدود ۱۰۰،۰۰۰ سد با ارتفاع کم با کاربری کنترل و تأمین آب، جلوگیری از سیل و ... موجود است که می‌توان از این سدها به منظور احداث نیروگاه‌های آبی با هد کم استفاده کرد [۱۴].

۳-۲- آنالیز اقتصادی نیروگاه‌های آبی با هد کم در کشور کانادا

هزینه اولیه یک نیروگاه آبی به طور کلی به وضعیت جغرافیایی منطقه، شرایط هیدرولیکی سایت، فاصله تا شبکه سراسری و .... بستگی دارد. با توجه به بالاتر بودن هزینه ساخت نیروگاه‌های آبی با هد کم آنالیز اقتصادی این‌گونه طرح‌ها اهمیت بیشتری دارد. هزینه اولیه یک نیروگاه آبی شامل هزینه‌های عمرانی، هزینه تجهیزات الکترومکانیکی، هزینه اتصال به شبکه سراسری و هزینه‌های مهندسی و اجرا می‌باشد. همان طور که پیش‌تر به آن اشاره شد، هزینه احداث نیروگاه‌های آبی با کم شدن اختلاف ارتفاع ریزش آب افزایش می‌یابد. به عنوان مثال هزینه طراحی و ساخت توربین کاپلان با هد ۶ متر حدود ۸۴٪ بیشتر از هزینه توربین کاپلان با همان توان و هد ۳۰ متر می‌باشد [۱۵]. یکی از راه‌های کم کردن هزینه اولیه ساخت نیروگاه‌های آبی با هد کم،

احداث آن‌ها در سدها، کانال‌ها و زیر ساخت‌های موجود است. در جدول ۷ سهم هریک از بخش‌ها در هزینه اولیه ساخت نیروگاه‌های آبی با هد کم در کشور کانادا با یکدیگر مقایسه شده است. با توجه به اینکه هزینه اولیه ساخت نیروگاه آبی وابستگی زیادی به شرایط سایت دارد، اعداد ذکر شده در این جدول تنها جهت مقایسه بیان شده‌اند. همان طور که در جدول ۷ دیده می‌شود، اکثر هزینه اولیه نیروگاه در صورت نداشتن زیر ساخت اولیه صرف هزینه‌های عمرانی طرح می‌شود و این در حالی است که در صورت وجود داشتن سد یا کانال با کمتر شدن سهم هزینه‌های عمرانی، هزینه کلی طرح کاهش می‌یابد.

جدول ۷: سهم بخش‌های مختلف هزینه اولیه ساخت نیروگاه‌های آبی با هد کم [۱۴]

نوع نیروگاه	هزینه‌های عمرانی	هزینه‌های تجهیزات الکترومکانیکی	هزینه انتقال و اتصال به شبکه سراسری	هزینه‌های مهندسی و اجرا
بدون زیر ساخت اولیه	۴۵٪	۳۵٪	۸٪	۱۲٪
با داشتن سد یا کانال	۲۵٪	۵۳٪	۱۲٪	۱۰٪

هزینه اولیه یک نیروگاه آبی با هد کم در واحد توان تولیدی بیشتر از نیروگاه‌های برقابی متداول می‌باشد. اما با توجه به عمر مفید بیشتر، هزینه تمام شده به کل برق تولیدی در زمان عمر مفید نیروگاه نسبت به سایر نیروگاه‌های تجدیدپذیر قابل مقایسه می‌شود. در جدول ۸ هزینه اولیه، هزینه تعمیر و نگهداری و همچنین هزینه تمام شده در واحد کل برق تولیدی در طول عمر مفید نیروگاه‌های تجدیدپذیر در کشور کانادا با یکدیگر مقایسه شده است.

۴- جمع بندی و نتیجه‌گیری

با توجه به لزوم استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر و نقش مهم انرژی برقابی با هد کم در تولید برق به صورت پراکنده، در کشورهای زیادی در این زمینه سرمایه‌گذاری شده است. به عنوان مثال کشور آمریکا از سال ۲۰۰۰ میلادی برنامه‌ریزی جهت بهره‌برداری از این‌گونه پتانسیل‌های برقابی را آغاز کرده است. با توجه به پتانسیل تئوری ۶۷ گیگاواتی کشور آمریکا در این حوزه، وزارت انرژی این کشور در نظر دارد تا پایان سال ۲۰۳۰ میلادی از بیش از ۳۰ GW پتانسیل برقابی میکرو با اختلاف ریزش کم آب بهره‌برداری کند. برای این منظور کشور آمریکا در سال‌های ۲۰۱۴ – ۲۰۰۸ میلادی بیش از ۸/۵ میلیون دلار در زمینه تحقیق و توسعه نیروگاه‌های آبی با هد کم سرمایه‌گذاری کرده است. این میزان بودجه که در قالب پروژه‌های مختلف سرمایه‌گذاری شده است، حدود ۱۴٪ از کل بودجه تحقیق و توسعه انرژی برقابی در کشور آمریکا را تشکیل می‌دهد. کشور آمریکا برای گسترش بیشتر این‌گونه نیروگاه‌ها و سرمایه‌گذاری بخش خصوصی در این زمینه سیاست‌های تشویقی مختلفی در نظر گرفته است. معافیت‌های مالیاتی، تأمین بخشی از هزینه اولیه و پرداخت وام‌های معاف از مالیات بخشی از این سیاست‌های تشویقی در این کشور است.

به طور کلی در نیروگاه‌های آبی با اختلاف ریزش کم آب با کم شدن هد، هزینه ساخت نیروگاه افزایش می‌یابد. بنابراین هزینه اولیه در واحد توان تولیدی این‌گونه نیروگاه‌ها از نیروگاه‌های آبی متداول بیشتر می‌باشد. یکی از راه‌های کم کردن هزینه اولیه ساخت نیروگاه، احداث آن در زیر ساخت‌های موجود مانند کانال‌ها و سدها می‌باشد که با کم شدن هزینه عمرانی پروژه، هزینه کلی ساخت نیروگاه کاهش می‌یابد. در کشور کانادا هزینه اولیه در واحد توان تولیدی این‌گونه نیروگاه‌ها بیشتر از سایر انرژی‌های تجدیدپذیر تخمین زده می‌شود. به عنوان مثال در این کشور هزینه اولیه در واحد توان تولیدی ساخت نیروگاه آبی میکرو با هد کم و با توان MW ۵- ۰ و بدون داشتن سد حدود دو برابر بیشتر از نیروگاه حرارتی خورشیدی با توان ۱۰۰ مگاوات تخمین زده شده است. اما با توجه به عمر مفید بالای ۵۰ سال، راندمان بالاتر و ضریب ظرفیت بیشتر نیروگاه‌های برقابی با هد کم، هزینه تمام شده در واحد کل انرژی الکتریکی تولیدی این‌گونه نیروگاه‌ها از برخی از انرژی‌های تجدیدپذیر مانند فتوولتائیک، زیست توده و نیروگاه حرارتی خورشیدی در کشور کانادا کمتر تخمین زده می‌شود.

با توجه به اختلاف کم هزینه تمام شده در واحد کل انرژی الکتریکی تولیدی نیروگاه‌های برقابی با هد کم در مقایسه با سایر انرژی‌های تجدیدپذیر و نقش مهم این‌گونه نیروگاه‌ها در تولید برق به صورت پراکنده، لزوم برنامه‌ریزی جهت شناسایی و بهره‌برداری از این‌گونه پتانسیل‌های برقابی میکرو در بسیاری از کشورهای جهان احساس می‌شود.

۵- منابع

[1] World Energy Resources;Charting the Upsurge in Hydropower Development, World Energy Council, 2015

[2] *Renewable Energy Technology: Cost Analysis Series, Vol. 1*, International Renewable Energy Agency, 2012

[3] David Kilama Okot, Review of small hydropower technology, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pages 515–520, 2013

[4] *Annual Energy review*, Accessed 10 July 2015, www.eia.gov/beta/MER/index.cfm?tbl=T07.01#/?f=A

[5] *Water Energy Resources of the United States with Emphasis on Low Head/Low Power Resources*, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, U.S. Department of Energy, 2004

[6] *Feasibility Assessment of the Water Energy Resources of the United States for New Low Power and Small Hydro Classes of Hydroelectric Plants*, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, U.S. Department of Energy, 2006

[7] *Statewide Small Hydropower Resource Assessment, California Energy Commission*, 2006

[8] Christopher J. Sandt, Martin W. Doyle, The hydrologic and economic feasibility of micro hydropower upfitting and integration of existing low-head dams in the United States, *Energy Policy*, No. 63 ,pages 261–271, 2013

[9] Henry Magallanez, Fernando Cadena, Zack Libbin, *Scalable Low-head Axial-type Venturi-flow Energy Scavenger*, Office of Energy efficiency and renewable energy, US Department of energy, 2010

[10] *Hydropower Projects 2008-2014*, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, US Department of energy, 2015

[11] *Internal Revenue Bulletin:2013-22*, Accessed 10 July 2015, www.irs.gov/irb/2013-22_IRB/ar07.html

[12] Gia D. Schneider, *Investment in Small Hydropower: Prospects of Expanding Low-Impact and Affordable Hydropower Generation in the West*, Natel Energy Company, 2010

[13] *Canadian Energy Overview 2014-Energy Briefing Note*, Accessed 10 July 2015, www.neb-one.gc.ca/nrg/ntgrtd/mrkt/vrvw/ 2014/ index-eng.html

[14] *Low Head Hydro Market Assessment Main Report*, Vol. 1, Natural Resources Canada, 2008

[15] Douglas G. Hall, Richard T. Hunt, Kelly S. Reeves, Greg R. Carroll, *Estimation of Economic Parameters of U.S. Hydropower Resources*, Idaho National Engineering and Environmental Laboratory, 2003

جدول ۸: مقایسه هزینه‌های نیروگاه‌های تجدیدپذیر در کشور کانادا [۱۴]

نوع نیروگاه تجدیدپذیر	توان تولیدی (MW)	هزینه اولیه (دلار/kW)	هزینه تعمیر و نگهداری متغیر (دلار/MWh)	هزینه تعمیر و نگهداری ثابت (دلار/kW)	عمر مفید (سال)	ضریب ظرفیت (٪)	هزینه تمام شده در واحد کل انرژی اکتریکی تولیدی (دلار/kWh)
زیست توده	۸۰	۲،۰۴۴	۳/۲	۵۴/۹	۲۰	۸۵	۰/۱۷۵۷
زمین گرمایی	۵۰	۲،۰۵۶	۰	۱۶۹/۴	۲۰	۸۵	۰/۰۵۰۹
باد	۵۰	۲،۵۰۰	۰	۳۱/۲	۲۰	۳۰	۰/۱۰۸۸
نیروگاه حرارتی خورشیدی	۱۰۰	۳،۴۴۴	۰	۵۸/۴	۲۰	۳۰	۰/۱۵۵۷
فتوولتائیک	۵	۷،۰۰۰	۰	۱۲	۲۰	۱۳	۰/۶۳۶۶
برقابی کوچک	۱۰	۳،۷۵۰	۵	۷۵	۵۰	۶۰	۰/۰۷۷۶
برقابی با هد کم (بدون داشتن سد)	۰ – ۵	۷،۰۰۰	۵	۱۴۰	۵۰	۶۰	۰/۱۴۰۵
برقابی با هد کم (با داشتن سد یا کانال)	۰ – ۵	۴،۵۰۰	۵	۹۰	۵۰	۶۰	۰/۰۹۲۱