

## بررسی و تحلیل اقتصادی و محیط زیستی توسعه نیروگاه‌های برقابی کوچک

حسن جنگ‌آور<sup>۱</sup>، یونس نوراللهی<sup>۲</sup>، علی امامی میبدی<sup>۳\*</sup>

۱. دانشجوی دکتری اقتصاد نفت و گاز، دانشکده اقتصاد، دانشگاه علامه طباطبائی، تهران

۲. دانشیار، دانشکده علوم و فنون، دانشگاه تهران

۳. دانشیار، دانشکده اقتصاد، دانشگاه علامه طباطبائی، تهران

(تاریخ دریافت ۱۳۹۶/۰۱/۲۹؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۶/۰۵/۲۰)

### چکیده

حفظ محیط زیست و پایان پذیر بودن منابع فسیلی برای تولید انرژی، توجه بشر را به استفاده از منابع جایگزین و تجدیدپذیر معطوف کرده است. از این رو، توسعه نیروگاه‌های برقابی از جمله راهکارهای به کار گرفته شده در کشورهای مختلف است. با توجه به تقسیم بندی نیروگاه‌های برقابی به کوچک و بزرگ مقیاس، بررسی عوامل اقتصادی و ملاحظات محیط زیستی تأثیر زیادی در انتخاب مقیاس بهینه نیروگاه‌های برقابی دارند. در این مطالعه از روش تحلیلی و بررسی تطبیقی برای تعیین آثار اقتصادی و محیط زیستی احداث نیروگاه‌های برقابی کوچک و مقایسه آنها با نیروگاه‌های برقابی بزرگ استفاده شده است. نتایج بیان کننده آن است که نیروگاه‌های برقابی کوچک علاوه بر امکان بهره‌برداری از کمترین پتانسیل آبی، از نظر اقتصادی و محیط زیستی نیز نسبت به نیروگاه‌های برقابی بزرگ مقیاس برتری دارند. برخی از مزیت‌های مهم نیروگاه‌های برقابی کوچک که سبب تمایز آنها از نیروگاه‌های برقابی بزرگ و توسعه آنها شده است، عبارت‌اند از: کم بودن هزینه‌های سرمایه‌گذاری، کوتاهی زمان ساخت، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، پراکندگی مناسب واحدها، ظرفیت مناسب انتقال فناوری و قابلیت سرمایه‌گذاری توسط بخش خصوصی. این مزیت‌ها موجب شده است که به نیروگاه‌های برقابی کوچک به‌عنوان جایگزین مناسبی برای نیروگاه‌های برقابی بزرگ توجه شود.

**کلیدواژه‌گان:** انرژی‌های تجدیدپذیر، عوامل اقتصادی، عوامل محیط زیستی، نیروگاه‌های برقابی بزرگ، نیروگاه‌های برقابی کوچک.

## مقدمه

افزایش قیمت نفت و وقوع بحران انرژی در دهه ۱۹۷۰، تأثیر مصرف سوخت‌های فسیلی بر تغییرات اقلیمی و لزوم کاهش مصرف آنها سبب جلب توجه بسیاری از کشورها به تحقیق درباره توسعه منابع تجدیدپذیر انرژی شده است. برای مقابله با قابلیت اطمینان کم ناشی از افزایش هزینه‌ها و کاهش عرضه سوخت‌های فسیلی و همچنین کاهش تغییرات اقلیمی و انتشار گازهای گلخانه‌ای، توسعه و بهره‌برداری از منابع انرژی‌های تجدیدپذیر سرعت فزاینده‌ای به خود گرفته است. اگرچه تولید انرژی از منابع تجدیدپذیر جایگزینی برای سوخت‌های فسیلی است، تولید انرژی از این منابع نیز هزینه‌های زیادی دارد. در میان انواع منابع تجدیدپذیر، توسعه واحدهای برقی در مقیاس‌های کوچک<sup>۱</sup>، مینی و میکرو، یکی از راهکارهای پاسخ‌گویی به نیاز روزافزون انرژی در جهان و جایگزین با منابع انرژی‌های فسیلی است. معمولاً، سیستم‌های تولید توان بر حسب ظرفیت به دسته‌های میکرو، مینی، کوچک، متوسط و بزرگ تقسیم می‌شوند. هر چند در این زمینه توافق کلی وجود ندارد و این تقسیم‌بندی در برخی کشورها متفاوت است، محدوده‌های یادشده به یکدیگر نزدیک‌اند. در جدول ۱ تقسیم‌بندی کلی سیستم‌های تولید توان آبی از نظر ظرفیت نشان داده شده است.

جدول ۱. تقسیم‌بندی سیستم‌های تولید توان از نظر ظرفیت تولید [۱]

نوع نیروگاه	توان (کیلووات)
میکرو	کمتر از ۱۰۰
مینی	۱۰۰ - ۱۰۰۰
کوچک	۱۰۰۰ - ۱۰۰۰۰
متوسط	۱۰۰۰۰ - ۱۰۰۰۰۰
بزرگ	بزرگ‌تر از ۱۰۰۰۰۰

نیروگاه‌های کوچک‌مقیاس، منبع انرژی پاک، بدون آلودگی و سازگار با محیط زیست‌اند. تولید و توزیع یکپارچه انرژی واحدهای برقی کوچک به دلیل داشتن مزیت‌هایی مانند احداث در مسیر رودخانه‌ها، ظرفیت کم، تأمین انرژی مورد نیاز مناطق دورافتاده و کم‌بودن هزینه‌ها مورد توجه قرار گرفته است. علاوه بر این، واحدهای برقی

کوچک با محیط زیست سازگارند. احداث واحدهای بزرگ یا متوسط‌مقیاس برقایی علاوه بر هزینه‌های زیاد احداث آنها و نیاز به حجم آب زیاد، مشکلات و هزینه‌های بسیاری در خصوص ایجاد شبکه انتقال و توزیع دارند. با وجود این، مهم‌ترین شرط توجیه‌پذیری اقتصادی احداث واحدهای برقایی بزرگ و متوسط‌مقیاس، وجود میزان تقاضای کافی برای انرژی در یک منطقه و تا حد ممکن به صورت متمرکز است. با توجه به پراکندگی جغرافیایی تقاضا در بسیاری از کشورها و افزایش هزینه‌های انتقال و توزیع ناشی از آن، احداث واحدهای برقایی کوچک‌مقیاس از جمله راهکارهای اجرایی مفید و جایگزین است. بنابراین، تمرکززدایی در بخش تأمین انرژی و ارتقا و بهبود امنیت انرژی، از مهم‌ترین دلایل توسعه نیروگاه‌های برقایی کوچک‌مقیاس در بسیاری از کشورهاست.

اگرچه هزینه احداث واحدهای برقایی کوچک کمتر از هزینه‌های احداث واحدهای برقایی بزرگ‌مقیاس است، هزینه به‌ازای هر واحد ظرفیت نصب‌شده در نیروگاه‌های برقایی کوچک، بیشتر از نیروگاه‌های برقایی بزرگ است. به بیان دیگر، احداث واحدهای بزرگ برقایی صرفه‌های اقتصادی بیشتری دارند. بنابراین، همان گونه که قبلاً بیان شد، تصمیم‌گیری برای احداث واحدهای برقایی کوچک‌مقیاس به در نظر گرفتن ملاحظات بسیاری مانند دسترسی به فناوری، هزینه‌های اقتصادی، توسعه اجتماعی و مسائل زیست‌محیطی نیاز دارد.

در این پژوهش تلاش شده است تا ابعاد اقتصادی و زیست‌محیطی تولید برق از طریق نیروگاه‌های برقایی کوچک بررسی و ارزیابی شود. در بخش دوم، پیشینه تحقیق بررسی شده است. در بخش سوم، به وضعیت نیروگاه‌های برقایی در جهان و ایران، و در بخش چهارم به اصول و مزیت‌های نیروگاه‌های برقایی کوچک پرداخته شده است. نیروگاه‌های برقایی کوچک از نظر اقتصادی و محیط زیستی در بخش‌های پنجم و ششم بررسی و ارزیابی شده‌اند و در نهایت در بخش هفتم، جمع‌بندی و نتیجه‌گیری انجام شده است.

## پیشینه تحقیق

کوتسویانیس [۲] در مطالعه‌ای نیروگاه‌های برقایی کوچک و بزرگ در یونان را بررسی و مقایسه کرد. نتایج پژوهش

1. Mini, Micro and Small

می‌شود. به‌منظور بررسی عوامل اقتصادی و محیط زیستی احداث نیروگاه‌های برقابی و انتخاب مقیاس بهینه آنها، از روش تحلیل اقتصادی و با استفاده از مطالعات و گزارش‌های معتبر بین‌المللی، پایگاه‌های داده و مقالات موجود به این سؤال اساسی پاسخ داده می‌شود که تصمیم‌گیری برای احداث واحدهای نیروگاهی برقابی کوچک در مقایسه با واحدهای نیروگاهی بزرگ با توجه به ملاحظات اقتصادی و زیست‌محیطی چگونه می‌تواند به کار گرفته شود. به‌طور کلی، با بررسی و تحلیل شاخص‌های مختلف اقتصادی و محیط زیستی، مزایا و معایب نیروگاه‌های برقابی بزرگ و کوچک مقیاس بررسی می‌شود تا بتوان مقیاس مناسب نیروگاه برقابی را انتخاب کرد. همچنین نبود آمار و اطلاعات مناسب در کشور و برخی از کشورهای در حال توسعه از محدودیت‌های انجام این پژوهش است.

#### بررسی وضعیت نیروگاه‌های برقابی کوچک در جهان

تا پیش از بحران انرژی، گرایش بیشتر به احداث و نصب نیروگاه‌های برقابی بزرگ بود. به‌کارگیری تدابیری برای کاهش سرمایه‌گذاری اولیه نیروگاه‌های برقابی کوچک، که خود ثمره بخشی از تلاش گسترده در جست‌وجوی راه‌های نوین و اقتصادی تأمین انرژی بود، موجب شد که این نیروگاه‌ها دوباره در کشورهای صنعتی به‌منظور بهره‌وری هر چه کامل‌تر از انرژی برقابی موجود و در کشورهای در حال توسعه بیشتر به‌منظور برق‌رسانی ارزان‌تر و آسان‌تر به مناطق و نواحی دورافتاده مطرح شوند. امروزه پس از گذشت حدود سه دهه از مطرح‌شدن دوباره توسعه نیروگاه‌های برقابی کوچک به‌دلیل نگرانی ناشی از آلودگی نیروگاه‌های حرارتی و نیز زمان کوتاه ساخت و هزینه کم توسعه این نوع نیروگاه‌ها، کشورهای مختلف به پیشرفت‌های صنعتی و اجرایی قابل توجهی در زمینه توسعه این نیروگاه‌ها دست یافته‌اند.

در حال حاضر بیشترین انرژی برق تجدیدپذیر جهان از بخش برقابی و با سهم ۷۱ درصد است (شکل ۱). بر اساس گزارش شورای جهانی انرژی در سال ۲۰۱۷، ظرفیت نصب‌شده نیروگاه‌های برقابی به بیش از ۱۰۶۴ گیگاوات در سال ۲۰۱۶ رسیده است که برابر سهم ۱۶/۴ درصدی از کل انرژی برق جهان از همه منابع و ۷۶ درصدی از منابع تجدیدپذیر است. بیشترین میزان ظرفیت نصب‌شده

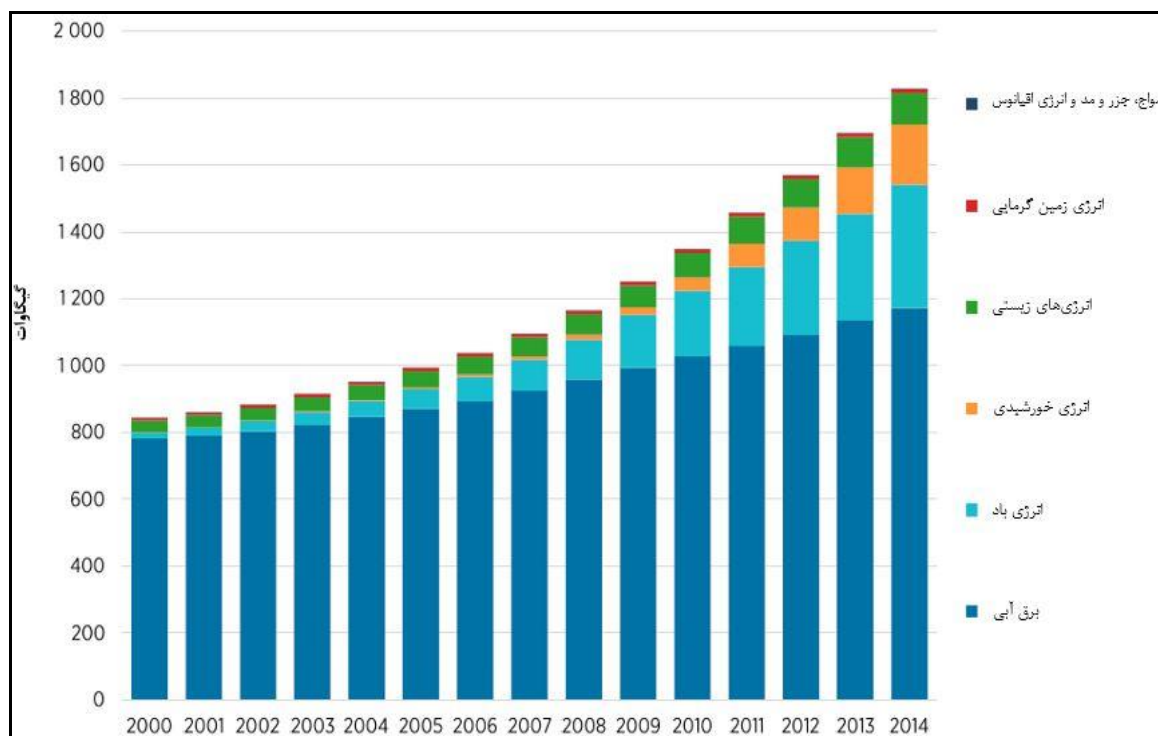
ایشان بیان می‌کند که وجود نیروگاه‌های برقابی کوچک مقیاس می‌تواند دسترسی مناطق حومه‌ای و روستایی به انرژی را افزایش دهد، اما توسعه نیروگاه‌های برقابی بزرگ مقیاس هزینه‌های تولید به ازای هر کیلووات ساعت برق را کاهش و بهره‌وری انرژی را افزایش می‌دهد. باکن و همکارانش [۳] در بررسی آثار زیست‌محیطی ۲۷ نیروگاه برقابی کوچک و سه نیروگاه بزرگ برقابی با نیروگاه‌های بادی در نروژ به این نتیجه رسیدند که مهم‌ترین مزیت نیروگاه‌های کوچک مقیاس در مقایسه با نیروگاه‌های آبی بزرگ و بادی، زمین کم مورد نیاز برای احداث این نیروگاه‌هاست. مقدار زمین مورد نیاز برای هر مگاوات ساعت برق از نیروگاه‌های برقابی بزرگ و بادی حدود ۴۵ تا ۵۰ مترمربع است که این میزان تقریباً دو برابر زمین مورد نیاز برای احداث واحدهای برقابی کوچک است. آدهوا [۴] به بررسی و تحلیل اقتصادی نیروگاه‌های کوچک مقیاس در هند پرداخته است. نتایج بررسی‌های ایشان نشان می‌دهد کاهش هزینه‌های انتقال برق از طریق احداث واحدهای برقابی کوچک، کاهش هزینه‌های ساخت آنها نسبت به واحدهای بزرگ برقابی، بی‌نیازی به احداث سد و قابلیت اجرا در رودخانه از جمله مزیت‌های توسعه نیروگاه‌های برقابی کوچک است. هیئت بین‌الدولی تغییرات اقلیم<sup>۱</sup> در گزارشی (۲۰۱۱) مزایای ناشی از احداث نیروگاه‌های برقابی کوچک را بررسی کرده است. مهم‌ترین منافع و مزایای این نیروگاه‌ها عبارت‌اند از: پایداری تولید انرژی؛ منتشرنشدن آلودگی؛ کم‌بودن هزینه‌های تعمیرات و نگهداری و نیز پایداری و ثبات بیش از ۹۰ درصد کارایی انرژی [۵].

از نظر روش‌شناسی بسیاری از سیستم‌های اقتصادی به‌صورت پویا، پیچیده، پیش‌بینی‌ناپذیر و حساس به شرایط اولیه‌اند. توجه به این ویژگی‌ها معلوم می‌کند که چرا با استفاده از مدل‌های ریاضی و اقتصادسنجی نمی‌توان به درک صحیحی از ارزیابی سیستم‌های اقتصادی و اجتماعی دست یافت و روابط میان آنها را به‌درستی تحلیل و پیش‌بینی کرد. در مطالعات و بررسی‌های اقتصادی معمولاً از یکی از دو روش اقتصادسنجی (مبتنی بر مدل‌سازی) و یا تحلیل اقتصادی به‌منظور تجزیه و تحلیل تأثیرات متقابل شاخص‌ها استفاده

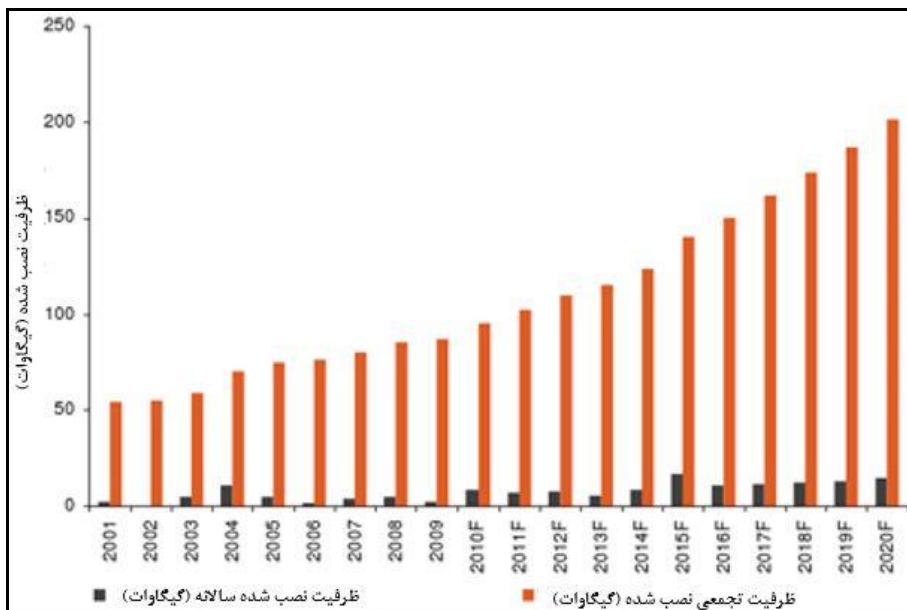
جهان تقریباً ۲۱۷ گیگاوات است. شکل ۲ ظرفیت نصب شده و پیش‌بینی ظرفیت نیروگاه‌های برقی کوچک تا سال ۲۰۲۰ را نشان می‌دهد. با توجه به ظرفیت‌های نصب‌شده فعلی، تا کنون به میزان ۳۶ درصد از ظرفیت بالقوه نیروگاه‌های برقی کوچک توسعه داده شده است. بیش از ۶۵ درصد از ظرفیت شناخته‌شده انرژی برقی‌های با مقیاس کوچک در آسیا وجود دارد و سهم اروپا و آمریکا به ترتیب برابر با ۱۶ و ۱۳ درصد است [۷]. حدود ۵۱ درصد از ظرفیت نصب‌شده جهانی نیروگاه‌های برقی کوچک متعلق به کشور چین است، این در حالی است که حدود ۲۹ درصد پتانسیل جهانی نیروگاه‌های برقی کوچک در این کشور قرار گرفته است [۷]. ظرفیت نصب‌شده در چین تقریباً چهار برابر مجموع ظرفیت‌های نصب‌شده نیروگاه‌های برقی کوچک در کشورهای ایتالیا، ژاپن، نروژ و آمریکا است. نیروگاه‌های برقی کوچک حدود ۱/۹ درصد از کل ظرفیت برق و ۷ درصد از کل ظرفیت انرژی‌های تجدیدپذیر جهان تا سال ۲۰۱۶ را به خود اختصاص داده‌اند [۷]. سهم هر یک از منابع تجدیدپذیر در تولید انرژی در شکل ۳ نشان داده شده است.

نیروگاه‌های برقی مربوط به کشور چین با ۲۶ درصد کل ظرفیت نصب‌شده در جهان است و کشورهای برزیل، آمریکا و کانادا به ترتیب با سهم‌های ۸/۶، ۷/۸ و ۷/۶ درصد در رتبه‌های بعدی قرار دارند. کشورهای چین، هند و ژاپن با دراختیارداشتن ۶۳۵۰۰، ۱۱۹۱۴ و ۱۰۲۷۰ مگاوات، بیشترین پتانسیل تولید برق از نیروگاه‌های برقی کوچک را دارند. هر یک از کشورهای یادشده تا کنون به‌میزان ۳۹۸۰۰، ۲۱۱۹ و ۳۵۴۵ مگاوات از پتانسیل برقی خود به‌صورت ظرفیت نصب‌شده را بهره‌برداری می‌کنند. پیش‌بینی می‌شود که با توجه به در اولویت قرار گرفتن موضوعات زیست‌محیطی و لزوم کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای از سوی کشورهای مختلف، تأمین انرژی از منابع برقی کوچک در سال‌های آتی رشد و توسعه چشمگیری یابد. به‌طور کلی، در حال حاضر ظرفیت بیش از ۱۰ هزار تراوات ساعت در سال در بخش برقی هست که در سال‌های آتی امکان توسعه و بهره‌برداری از آنها وجود دارد [۶].

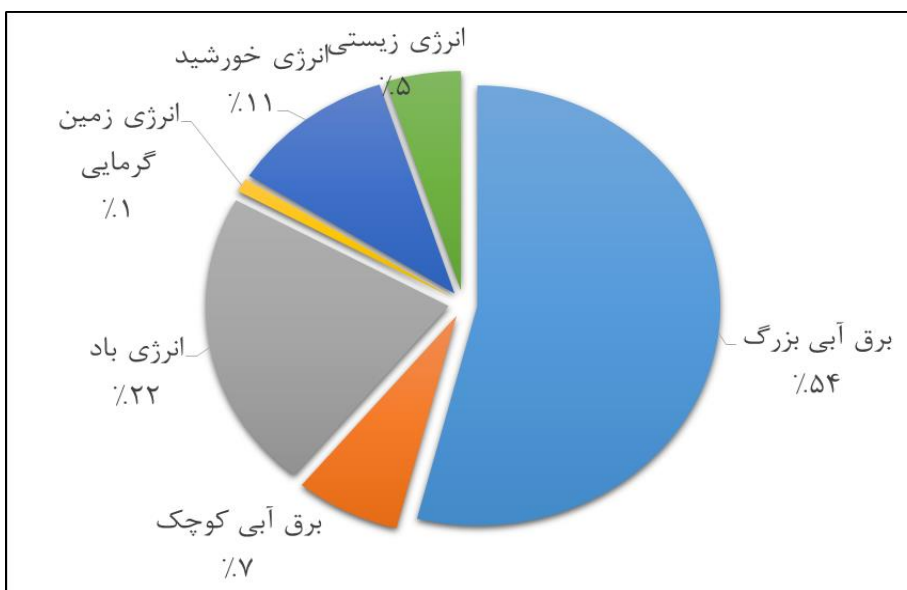
ظرفیت نصب‌شده نیروگاه‌های برقی کوچک در جهان در سال ۲۰۱۶ به ۷۸ گیگاوات رسیده است. این در حالی است که پتانسیل احداث نیروگاه‌های برقی کوچک در



شکل ۱. ظرفیت نصب‌شده نیروگاه‌های برقی در دنیا [۶]



شکل ۲. ظرفیت نصب شده و پیش‌بینی ظرفیت نیروگاه‌های برقابی کوچک تا سال ۲۰۲۰ [۷]



شکل ۳. سهم منابع تجدیدپذیر در تولید برق سال ۲۰۱۶ [۷]

یک از منابع در سبد تأمین انرژی از منابع تجدیدپذیر در آینده تغییر یابد.

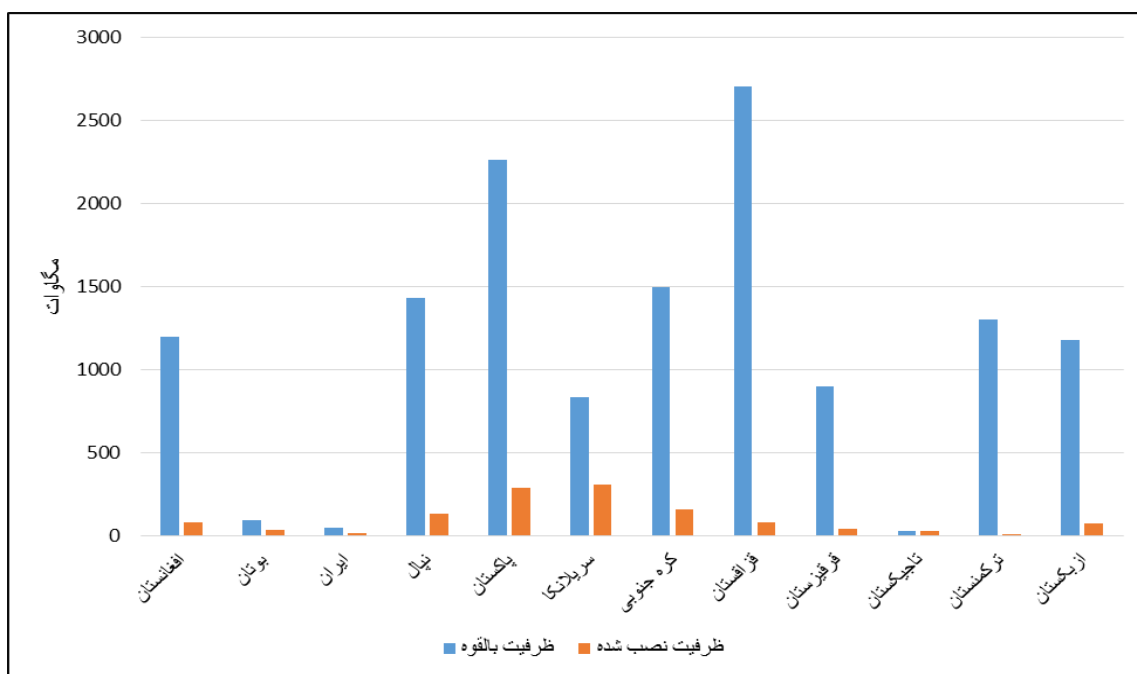
**بررسی وضعیت نیروگاه‌های برقابی کوچک در ایران**

از آنجا که فناوری‌های پیشرفته تولید انرژی برقابی امکان بهره‌برداری از کمترین پتانسیل آبی را فراهم آورده است، در ایران نیز به‌رغم موقعیت خاص اقلیمی و کم بودن میزان نزولات جوی، ظرفیت‌های آبی فراوانی وجود دارد که امکان احداث نیروگاه‌های برقابی کوچک را فراهم کرده‌اند. علاوه بر نیروگاه‌های برقابی بزرگ، که معمولاً با استفاده از

همان گونه که در شکل ۳ ملاحظه می‌شود، نیروگاه‌های برقابی کوچک با داشتن حدود ۷ درصد از سهم کل منابع تجدیدپذیر در تولید انرژی در سال ۲۰۱۶، در رتبه چهارم و پس از واحدهای برقابی بزرگ باد و خورشید قرار دارد. نکته مهم در شکل ۳، تفاوت معنادار سهم واحدهای نیروگاهی برقابی بزرگ و کوچک است. تفاوت در صرفه‌های اقتصادی از مهم‌ترین دلایل زیاد بودن سهم نیروگاه‌های برقابی بزرگ است. همچنین پیش‌بینی می‌شود با در نظر گرفتن ملاحظات محیط زیستی، سهم هر

کشوری خشک و نیمه‌خشک به‌شمار می‌آید و رتبه ۳۵ را در بین کشورهای مختلف جهان از نظر تولید برق از منابع آبی (شامل برق‌آبی‌های کوچک و بزرگ) دارد. همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده است، مقایسه ظرفیت‌های بالقوه و نصب‌شده ایران با برخی کشورهای آسیایی در زمینه تولید توان از نیروگاه‌های برق‌آبی کوچک بیان می‌کند که کشور هم از منظر وجود ظرفیت بالقوه و هم ظرفیت‌های نصب‌شده و در حال بهره‌برداری، در رتبه‌های پایینی قرار دارد. این مقایسه در حالی صورت گرفته است که کشورهایی مانند چین، هند و ژاپن در نظر گرفته نشده‌اند.

سدهای مخزنی احداث می‌شوند، نیروگاه‌های برق‌آبی کوچک در مسیر جریان آبی قرار می‌گیرند که از ارتفاعات کوهستانی جریان پیدا می‌کنند. خط مشی اولیه احداث نیروگاه‌های برق‌آبی کوچک در ایران، تأمین انرژی برق مناطق روستایی برای ایجاد زیرساخت‌های توسعه پایدار در روستاها و تأمین شرایط زندگی بهتر و ارتقای سطح فرهنگ، دانش و سلامت روستاییان و نیز اشتغال‌زایی بوده است. وجود محدودیت‌های اقتصادی و محیط زیستی ناشی از احداث نیروگاه‌های برق‌آبی بزرگ‌مقیاس، در سال‌های اخیر سیاستگذاران را به توسعه نیروگاه‌های برق‌آبی کوچک در کشور مصمم کرده است. ایران از نظر جغرافیایی،



شکل ۴. پتانسیل‌ها و ظرفیت‌های نصب‌شده واحدهای برق‌آبی کوچک در برخی کشورهای آسیایی [۷]

نظر تولید انرژی توسط نیروگاه‌های برق‌آبی مواجه کرده است. تا پایان سال ۱۳۹۳، به‌رغم مشکلاتی نظیر تأمین نشدن منابع مالی مورد نیاز، مشکلات نقدینگی صنعت برق، خشکسالی و سیاست‌های کاهش انتشار آلاینده‌های محیط زیستی، ظرفیت نیروگاه‌های برق‌آبی در حال بهره‌برداری کشور به ۱۰,۷۷۸ مگاوات رسیده است [۸]. از کل ظرفیت نیروگاه‌های برق‌آبی در حال بهره‌برداری، ۱۶/۶۴ مگاوات آن متعلق به نیروگاه برق‌آبی کوچک است. مطالعات و بررسی‌های انجام‌شده بیان می‌کند که کشور ظرفیت بالقوه نصب ۴۹ مگاوات نیروگاه

همان‌گونه که در شکل ۴ ملاحظه می‌شود، اگرچه پتانسیل کشور در تولید برق از منابع برق‌آبی کوچک نسبت به بسیاری از کشورها در جایگاه‌های پایین‌تری قرار دارد، توسعه این ظرفیت‌های موجود نیز مناسب نبوده است. به‌طوری که از حدود ۴۹ مگاوات ظرفیت بالقوه برق‌آبی کوچک در کشور، فقط به میزان ۱۶/۵ مگاوات بهره‌برداری شده است.

در پی وقوع خشکسالی و کاهش شدید بارندگی‌ها از سال ۱۳۸۶ و کاهش حجم ذخیره آب پشت سدها، ایران را با مشکلات جدی چه از لحاظ تأمین آب شرب و چه از

آذربایجان غربی، کردستان، ایلام، لرستان و خوزستان وجود دارند. پیش‌بینی می‌شود که با بهره‌برداری از طرح‌های در حال اجرا و برنامه‌ریزی‌شده، سهم استفاده از منابع برقابی کوچک به بیش از ۹۵ درصد از پتانسیل موجود در سال‌های آتی افزایش یابد. واحدهای برقابی کوچک مقیاس بهره‌برداری‌شده و در حال اجرا در کشور، در جدول ۲ شرح داده شده‌اند.

همان‌گونه که در جدول ۲ نشان داده شده است، ظرفیت در حال بهره‌برداری واحدهای برقابی کوچک در کشور به میزان ۱۶/۵ مگاوات است که در مقایسه با پتانسیل‌های موجود در سطح پایینی است. بنابراین، اگرچه تا کنون از ظرفیت‌های منابع برقابی‌های کوچک در کشور بهره‌برداری قابل توجهی نشده است، برنامه‌ریزی‌های انجام‌شده نشان‌دهنده آن است که در سال‌های آتی تولید برق از واحدهای برقابی کوچک رشد چشمگیری خواهد داشت. به‌طور کلی، سهم واحدهای نیروگاهی برقابی کوچک در تأمین انرژی در مقایسه با واحدهای برقابی بزرگ، کمتر است. اما با توجه به شرایط و هزینه‌های اقتصادی و توسعه شبکه‌های برق‌رسانی و تأمین انرژی مورد نیاز به عموم جامعه، شاهد توسعه بیشتر واحدهای برقابی کوچک در کشور خواهیم بود.

برقابی کوچک را دارد. به‌بیان دیگر، هم‌اکنون ایران فقط از ۳۴ درصد پتانسیل منابع برقابی کوچک خود استفاده کرده است. همان‌گونه که قبلاً بیان شد، وجود محدودیت‌ها و موانع اقتصادی و محیط زیستی احداث واحدهای برقابی بزرگ، سبب توسعه بیشتر نیروگاه‌های برقابی کوچک در کشور شده است. به همین منظور تا کنون بیش از ۲۵۰۰ منطقه برای ساخت نیروگاه‌های آبی کوچک در کشور شناسایی و حدود ۹۴۴ نقطه برای احداث نیروگاه‌های برقابی کوچک مناسب تشخیص داده شده است و بیش از ۱۵ واحد در حال بهره‌برداری و یا در حال اجرا هستند [۹]. با بررسی و شناسایی مناطق مختلف کشور، برنامه‌ریزی‌های بسیاری برای اجرای طرح‌های برقابی کوچک در کشور انجام شده است. به این منظور و علاوه بر طرح‌های در حال اجرا، ظرفیت‌های قابل احداث واحدهای برقابی کوچک دیگری نیز در کشور شناسایی شده‌اند که در استان‌های گیلان، اردبیل، کرمانشاه و قزوین به ترتیب با ظرفیت‌های ۱۰، ۱۰، ۸ و ۷ مگاوات قرار دارند، به‌طوری که در هر یک از استان‌های یادشده به ترتیب ۶، ۷، ۴ و ۵ طرح در حال بررسی‌اند [۹]. پراکندگی مناطق دارای پتانسیل احداث واحدهای برقابی کوچک کشور بیشتر در استان‌های ساحلی دریای خزر و استان‌های غربی به‌ویژه

جدول ۲. واحدهای برقابی کوچک مقیاس کشور [۹]

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

### اصول و مزایای نیروگاه‌های برقایی کوچک

علاوه بر اصولی که دربارهٔ احداث واحدهای نیروگاهی برقایی کوچک باید به آنها توجه داشت، این نوع واحدهای نیروگاهی برخی مزیت‌ها نسبت به واحدهای برقایی بزرگ دارند. مقایسهٔ این مزیت‌ها، این امکان را فراهم می‌آورد تا سیاستگذاران بتوانند در ارائهٔ تصمیم‌های خود دقت بیشتری کنند.

به‌طور کلی، تولید انرژی از منابع برقایی در مقایسه با سایر منابع تجدیدپذیر از نظر هزینهٔ فناوری مقرون‌به‌صرفه‌تر و از منظر دسترسی نیز قابل‌انکاترند. از دیگر مزیت‌های واحدهای برقایی امکان اصلاح و تعدیل تجهیزات مورد نیاز آنها بر اساس ضریب ظرفیتشان است [۱۲]. علاوه بر این، برق تولیدی ناشی از واحدهای برقایی امکان اتصال به انواع شبکه‌های انتقال از کوچک، بزرگ و حتی مستقل را دارند. در بسیاری از کشورهای در حال توسعه از طریق احداث واحدهای برقایی کوچک می‌توانند به بسیاری از مناطقی که دسترسی به برق ندارند را فراهم کرده و از طریق ایجاد شبکه‌های مستقل برق، با هزینهٔ کمتری انرژی مورد نیاز بسیاری از مناطق را تأمین کنند. بنابراین، این امکان وجود دارد که واحدهای برقایی کوچک جایگزین بسیاری از واحدهای تولید برق با سوخت‌های فسیلی و زغال‌سنگ شوند. علاوه بر این، واحدهای کوچک برقایی در مقایسه با واحدهای برق با سوخت‌های فسیلی و یا زغال‌سنگ، تأثیرات محیط زیستی کمتری دارند.

فناوری‌های استفاده‌شده در واحدهای نیروگاهی برقایی کوچک از جمله فناوری‌های پیشرفته هستند که فعالیت و تعمیرات آنها در مقایسه با سایر روش‌های تولید برق ساده‌تر است. بنابراین، از آنها به‌عنوان یکی از راهکارهای تولید برق پایدار در بسیاری از کشورها استقبال شده است. علاوه بر این، قیمت‌های تولید برق از طریق واحدهای برقایی کوچک نسبت به سایر فناوری‌های تولید برق مستقل از شبکه بسیار کمتر است. بنابراین، می‌توان آنها را بر اساس جغرافیای محلی، شرایط اقتصادی - اجتماعی و محیط زیستی تعدیل کرد [۷]. سهم نیروگاه‌های برقایی کوچک از کل تولید برق جهان در آینده با توجه به افزایش ملاحظات و استانداردهای محیط زیستی و ضریب ظرفیت واحدهای برقایی بزرگ، افزایش خواهد یافت. برخی مزیت‌های احداث واحدهای برقایی کوچک نسبت به واحدهای برقایی بزرگ بر اساس یافته‌های این پژوهش و مطالعات دیگران در جدول ۳ بیان شده است.

نیروگاه‌های برقایی مزایای متعددی از نظر دسترسی به منابع، ظرفیت انرژی تولیدی، اندازهٔ واحدهای نیروگاهی و ظرفیت آنها در مقایسه با دیگر منابع انرژی دارند [۱۰]. به‌طور کلی، دو عامل اصلی تعیین‌کنندهٔ میزان تولید انرژی عبارت‌اند از: میزان جریان آب و اختلاف ارتفاع. بنابراین، از طریق محاسبهٔ پارامترهای تأثیرگذار، می‌توان به میزان کارایی نصب واحدهای برقایی دست یافت. باید توجه داشت که در تحقیقات مختلفی (از نظر تجربی و عددی) به بررسی کارکرد میزان تولید واحدهای برقایی کوچک در جهان پرداخته شده است. از سوی دیگر، نیز مراحل برای اجرای طرح‌های احداث واحد تولید برق از منابع برقایی در مقیاس کوچک پیش‌بینی شده است که در ادامه مراحل توصیه‌شده از سوی انجمن واحدهای برقایی کوچک اروپا بیان شده است [۱۱].

۱. شناسایی محل احداث واحد برقایی کوچک: شامل شناسایی و تعیین ویژگی‌های اصلی مورد نیاز و ضروری برای اجرای طرح؛

۲. تجزیه و تحلیل مقدماتی: شامل ارزیابی اولیهٔ فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی اجرای طرح؛

۳. امکان‌سنجی فنی - اقتصادی: شامل ارزیابی فنی، اقتصادی و محیط زیستی طرح و تعیین راهکار نهایی انجام آن؛

۴. اجرا: شامل طراحی مشخصات کلی طرح (شامل تجهیزات و نیروی کار فنی و مهندسی) و طرح‌های نهایی با تمرکز بر کیفیت آب و یکپارچه‌سازی زیرساخت‌های فعلی؛

۵. اطلاع‌رسانی عمومی: اطلاع‌رسانی عمومی در خصوص اجرای طرح به‌منظور کاهش ریسک مخالفت‌های عمومی در آینده؛

۶. نظرسنجی عمومی/اختصاصی: انجام نظرسنجی از مدیران و صاحب‌نظران به‌منظور دست‌یابی به نظرات گروه (های) خاصی در یک منطقه و حتی کشور؛

۷. فراخوان برای تعیین مجری و طراحی نهایی: شامل شناسایی و دسترسی به تأمین‌کنندگان تجهیزات، تعیین تعداد و سطح تخصص‌های فنی و مهندسی مورد نیاز و طراحی برنامهٔ نهایی احداث واحد برقایی؛

۸. اجرا و راه‌اندازی: شامل ساخت توربین، نیروی کار ماهر و استقرار در محل اجرای طرح.



جدول ۳. مزیت‌های واحدهای برقابی کوچک نسبت به واحدهای برقابی بزرگ [۱۲]

ردیف	توضیح	دلالت
۱	کاهش نیافتن فقر ناشی از اجرای واحدهای برقابی بزرگ در منطقهٔ احداث	در بیشتر کشورها، مشاوره و ساخت طرح‌های بزرگ برقابی از سوی شرکت‌های خارجی انجام می‌شود. این مهم به‌طور معمول سبب می‌شود که درآمد کمتری نصیب مردم محلی شود.
۲	عدم تأمین مالی کافی برای احداث واحدهای برقابی بزرگ	هزینهٔ زیاد اجرای طرح‌های برقابی بزرگ و کمبود منابع مالی دولت‌ها در تأمین مالی این طرح‌ها، سبب کندشدن مراحل اجرایی و عملیاتی می‌شود [۱۳].
۳	احتمال افزایش تغییرات اقلیمی با افزایش تعداد نیروگاه‌های برقابی بزرگ	اگرچه سدهای واحدهای برقابی بزرگ سبب کنترل سیلاب‌ها می‌شوند، توسعهٔ آنها موجب افزایش احتمال خشکسالی‌های حدی می‌شود. همچنین قطع درختان و جنگل‌ها و تبدیل آنها به مخازن ذخیرهٔ آب پشت سدها، موجب کاهش میزان جذب دی‌اکسیدکربن ناشی از سوخت‌های فسیلی می‌شود و در نتیجه گرمایش جهانی افزایش می‌یابد.
۴	تأثیرات منفی واحدهای برقابی بزرگ بر شرایط اجتماعی و اکولوژی منطقه	احداث سدها سبب جابه‌جایی افراد از محل زندگی‌شان و مهاجرت به مناطق دیگر می‌شود.
۵	هزینه‌های زیاد سرمایه‌گذاری و فناوری‌های غیرانعطاف‌پذیر نیروگاه‌های برقابی بزرگ	مدت زمان اجرای طرح‌های بزرگ برقابی به‌صورت میانگین پنج سال و هشت ماه است. معمولاً یک سال نیز به زمان تخمینی اجرای طرح افزوده می‌شود که همهٔ آنها سبب هزینه‌بردن طرح می‌شود.
۶	نیروگاه‌های برقابی بزرگ میزان قابل توجهی گازهای گلخانه‌ای منتشر می‌کنند.	علاوه بر قطع درختان برای ساخت سد و جذب‌نشدن دی‌اکسیدکربن ناشی از سوخت‌های فسیلی توسط آنها، فعالیت موجودات ناشی از ایجاد مخازن ذخیرهٔ آب نیز سبب افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌شود. [۱۴]

برقابی کوچک، هزینه‌های احداث به‌ازای هر کیلووات ساعت از جمله اصلی‌ترین عوامل تأثیرگذار در انتخاب مقیاس نیروگاه است. در ادامه، هزینه‌های تولید نیروگاه‌های برقابی بزرگ و کوچک بررسی و ارزیابی شده است.

طرح‌های برقابی کوچک مانند طرح‌های برقابی بزرگ از نظر هزینه‌های تولید بسیار متنوع و متفاوت‌اند. تفاوت در میزان هزینه‌های تولید برق به ضریب ظرفیت واحد و هزینهٔ سرمایه‌گذاری بستگی دارد. هزینه‌های احداث یک نیروگاه برقابی کوچک از حداقل ۳۲/۴ تا ۲۱۲/۹ یورو برای هر مگاوات ساعت متغیر است [۱۵]. آژانس بین‌المللی انرژی‌های تجدیدپذیر نیز گسترهٔ هزینه‌ها را مشابه با آنچه آژانس بین‌المللی انرژی برآورد و اعلام کرده، دانسته است [۱۶]. بنابراین، میزان هزینه‌های تولید برق واحدهای برقابی به مقیاس نیروگاه بستگی دارد و حتی ممکن است هزینهٔ تولید برق در واحدهای کوچک مقیاس برقابی در برخی شرایط تا ۲۷۰ دلار برای هر مگاوات ساعت نیز افزایش یابد. باید به این نکته توجه داشت که هزینه‌های متوسط اجرای طرح‌های برقابی کوچک فقط در صورت تغییر نکردن شرایط آبی منطقه

همان‌گونه که در جدول ۳ ملاحظه می‌شود، احداث نیروگاه‌های برقابی بزرگ برخی ویژگی‌ها دارد که توجیه‌پذیری آنها را صرفاً به‌دلیل کم‌بودن هزینهٔ سرانهٔ به‌ازای هر واحد برق تولیدشده، با مشکل روبه‌رو می‌کند. بنابراین، تصمیم‌گیری دربارهٔ انتخاب ظرفیت و مقیاس نیروگاه‌های برقابی مستلزم توجه به همهٔ شرایط مانند نوع فناوری، امکان تأمین مالی هزینه‌های طرح، تأثیرات زیست‌محیطی و اجتماعی است.

#### ارزیابی اقتصادی واحدهای برقابی کوچک

ارزیابی اقتصادی طرح‌ها معمولاً با محاسبهٔ هزینه‌های اجرا و درآمدهای حاصل از آن و از طریق به‌دست‌آوردن شاخص‌های اقتصادی شامل مقدار نسبت درآمد به هزینه (B/C)، ارزش خالص فعلی (NPV)، بهای هر مترمکعب آب کنترل و تنظیم‌شده و یا هر کیلووات ساعت برق تولیدی و میزان بازگشت سرمایه انجام می‌شود. بدیهی است که در هر طرح، با توجه به اهداف آن یک یا چند شاخص اقتصادی معیار انتخاب گزینهٔ برتر و ارزیابی اقتصادی طرح قرار می‌گیرد. برای بررسی اقتصادی نیروگاه‌های برقابی بزرگ و نیروگاه‌های

می‌شود. عوامل متعددی در تعیین طول دوره زمانی بازگشت سرمایه تأثیرگذار هستند که برخی از آنها عبارت‌اند از: میزان تورم، میزان بهره وام و میزان تعرفه‌های خرید برق. اما آنچه برای اجرای واحدهای کوچک برقی با فرض باثبات در نظر گرفتن قیمت برق، که تعیین‌کننده میزان درآمدها است، کاهش هزینه‌های مرتبط با آن است. کاهش هزینه‌ها می‌تواند سبب کاهش دوره بازگشت سرمایه و تشویق سرمایه‌گذاران شود. سرمایه مورد نیاز به‌منظور احداث واحدهای برقی علاوه بر عوامل اقتصادی، به متغیرهای فنی مختلفی بستگی دارد. این متغیرها به‌صورت کلی عبارت‌اند از: دبی آب، ویژگی‌های زمین‌شناسی و جغرافیایی، تجهیزات (شامل توربین‌ها، ژنراتورها و...) و نیروی کار فنی و مهندسی مورد نیاز. استفاده از زیرساخت‌های موجود مانند آب‌بندها، سدها و مخازن ذخیره‌سازی سبب کاهش قابل توجه هزینه‌ها و تأثیرات محیط زیستی می‌شود. به‌طور کلی، احداث واحدهای تولید برق در محل‌هایی که به جریان و میزان زیاد آب نیاز دارند، به سرمایه بیشتری از طریق ارائه خدمات مهندسی بیشتر و تجهیزات توربین به‌منظور کنترل میزان بیشتر آب نیاز دارد. بنابراین، نیروگاه‌های برقی بزرگ به اقدامات و فعالیت‌های بیشتری برای تولید برق نیاز دارند، که این به نوبه خود سبب افزایش هزینه‌ها و افزایش دوره بازگشت سرمایه می‌شود. در مقابل، مقیاس کوچک واحدهای برقی می‌تواند به‌عنوان مزیتی برای کاهش هزینه‌ها و کاهش دوره بازگشت سرمایه مورد توجه قرار گیرد.

با توجه به آنچه بیان شد، بررسی هزینه‌های تولید برق در نیروگاه‌های برقی بزرگ و کوچک تأیید می‌کند که هزینه تولید به‌ازای هر کیلووات ساعت برق در نیروگاه‌های برقی کوچک کمتر از هزینه‌های تولید در نیروگاه‌های برقی بزرگ است. کم‌بودن هزینه‌های تولید سبب توجیه‌پذیری و توسعه نیروگاه‌های برقی کوچک در کشورهای مختلف شده است. علاوه بر این، کم‌بودن هزینه تولید برق در نیروگاه‌های برقی کوچک از مهم‌ترین عوامل کاهش دوره بازگشت سرمایه‌گذاری است که می‌تواند موجب تسهیل در جذب منابع مالی به‌منظور احداث و بهره‌برداری از آنها شود.

#### ارزیابی محیط زیستی واحدهای برقی کوچک

احداث واحدهای برقی سبب بروز برخی تأثیرات محیط زیستی می‌شود که با توجه به ابعاد و مقیاس آنها، متفاوت

و ثبات هزینه‌ها در سال‌های اجرای طرح، به میزان یادشده خواهد بود. از سوی دیگر، برای احداث طرح‌های تولید برقی بزرگ، هزینه سرمایه‌گذاری نیز با توجه به مقیاس آن، بیشتر خواهد بود. بخش عمده هزینه‌های مربوط به واحدهای برقی بزرگ مختص به احداث سد و ساخت نیروگاه است. هزینه‌های احداث واحدهای برقی بزرگ از ۱۴۰۰ تا ۱۹۰۰ یورو به‌ازای هر کیلووات‌ساعت متغیر است. از دیگر هزینه‌های عمده در واحدهای بزرگ مقیاس، هزینه‌های عملیاتی و نگهداری مانند تعمیرات و بیمه است. بررسی‌ها نشان‌دهنده آن است که حدود ۰/۳۳ یورو به‌ازای هر کیلووات‌ساعت از برق تولیدشده در هر نیروگاه برقی برای تأمین مالی بخش عملیاتی و حدود ۰/۲۵ یورو به‌ازای هر کیلووات‌ساعت برای تعمیرات آن نیاز است [۱۷]. به‌علت زیادبودن هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه واحدهای برقی بزرگ، احداث آنها فقط برای ظرفیت‌های زیاد و در صورت وجود تقاضای کافی برای برق تولیدی توجیه اقتصادی دارد. مهم‌ترین ریسک مربوط به طرح‌های تولید نیروگاه‌های بزرگ برقی، وجود تغییرات زیاد در قیمت‌های برق است. قیمت برق یکی از عواملی تأثیرگذار در انجام ارزیابی مالی، توجیه‌پذیری اقتصادی و تعیین دوره بازگشت سرمایه در طرح‌های نیروگاهی است. تغییرات زیاد و متوالی در قیمت‌گذاری برق در کشورهایی که تعیین قیمت به‌صورت دستوری است، احتمال اقتصادی نشدن طرح‌های تولید برق را افزایش داده و به دنبال آن انگیزه سرمایه‌گذاران را کاهش می‌دهد. بنابراین، به‌منظور برآورد واقعی از میزان هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بازپرداخت آنها، ثبات در قیمت برق و یا حداقل قابل پیش‌بینی بودن قیمت‌ها در آینده ضروری است. بنابراین، کشورهایی که در بخش انرژی ثبات قیمتی دارند، شانس بیشتری برای تأمین منابع مالی و جذب سرمایه‌های مورد نیاز به‌منظور اجرای طرح‌های تولید برق را دارند.

یکی دیگر از روش‌های مرسوم در ارزیابی اقتصادی برای سرمایه‌گذاری در واحدهای نیروگاهی برقی، تعیین دوره زمانی بازگشت سرمایه است. به‌بیان دیگر، مدت زمانی که درآمد خالص امکان جبران همه سرمایه به‌کار گرفته‌شده برای احداث واحد نیروگاهی را ممکن می‌کند، در تصمیم‌گیری سرمایه‌گذاران تأثیر بسیار زیادی دارد. بنابراین، با توجه به اینکه مقیاس نیروگاه برقی به صورت بزرگ یا کوچک باشد، تغییر در هزینه‌ها سبب تغییر در دوره بازگشت سرمایه

کوچک برقابی است. به این معنا که اگر برخی زیرساخت‌های مورد نیاز از قبل وجود داشته باشند، می‌توان با لحاظ آنها از میزان تأثیرگذاری احداث واحدهای برقابی بر شاخص‌های محیط زیستی کاست. اما به‌طور کلی، برخی زیرساخت‌ها با هدف احداث نیروگاه ایجاد خواهند شد، که تأثیر آنها بر شاخص‌های زیست‌محیطی قابل توجه خواهد بود که این بستگی به مقیاس واحد تولید برق دارد. برخی از شاخص‌های جدول ۴ برای مقایسه واحدهای بزرگ و کوچک برقابی استفاده شده‌اند که در جدول ۵ بیان شده‌اند [۱۹ و ۲۰]. مقایسه شاخص‌های یادشده این امکان را فراهم می‌کند که تصمیم‌گیران بتوانند علاوه بر معیارهای اقتصادی، از طریق شاخص‌های زیست‌محیطی نیز ظرفیت مناسب نیروگاه‌های برقابی را انتخاب کنند.

خواهد بود. به‌منظور بررسی میزان تأثیرگذاری احداث واحدهای نیروگاهی برقابی کوچک بر ابعاد مختلف محیط زیستی، ضروری است که در مرحله نخست اقدام به شناسایی متغیرهای زیست‌محیطی شود. بیشترین متغیرهای قابل بررسی در این خصوص بر اساس مطالعات باکن و همکارانش (۲۰۱۲) و میزان تأثیرگذاری احداث واحدهای کوچک برقابی در جدول ۴ بیان شده است [۱۸].

آنچه در جدول ۴ به‌عنوان شاخص‌های زیست‌محیطی تأثیرپذیر ناشی از احداث واحدهای برقابی است، با درجه‌های متفاوتی درباره واحدهای بزرگ برقابی نیز صادق است. تأثیرپذیری شاخص‌های یادشده ناشی از ایجاد و توسعه زیرساخت‌های دائمی یا موقتی مانند جاده‌های دسترسی و خطوط شبکه انتقال برق برای احداث واحدهای نیروگاهی

جدول ۴. میزان تأثیرگذاری احداث واحدهای برقابی بر شاخص‌های زیست‌محیطی [۱۸]

میزان تأثیرپذیری (درصد)	نوع شاخص محیط زیستی
۱۰۰	کاهش جریان آب
۷۸	تأثیرگذاری بر ماهیان
۶۷	تجاوز به مناطقی که قبلاً استفاده نشده‌اند
۵۶	تخم‌گذاری ماهیان
۱۱	تأثیر احداث خطوط لوله ناشی از اجرای طرح
۱۱	تغییر در کیفیت آب
۷	تأثیر بر موجودات زنده در آب و یا در کنار آب ناشی از کاهش جریان آب
۷	تغییرات دمای آب
۷	تأثیر بر محیط حفاظت‌شده ناشی از تفریحگاه‌های طبیعی
۴	تأثیر بر طبیعت منطقه
۴	تأثیر منفی بر مناطق دارای فضای جنگلی
۴	تأثیر منفی بر مرداب‌ها
۴	تأثیر منفی از طریق کاهش رطوبت برای خزها

جدول ۵. مقایسه تأثیرات شاخص‌های محیط زیستی واحدهای برقابی بزرگ و کوچک [۱۹]

واحد‌های برقابی کوچک	واحد‌های برقابی بزرگ	نوع تأثیر محیط زیستی (تولید انرژی / اثر)
کم (منفی)	متوسط (منفی)	دمای آب
کم (منفی)	زیاد (منفی)	اقلیم منطقه
متوسط (منفی)	کم (منفی)	فرسایش خاک
متوسط (منفی)	متوسط (منفی)	چشم‌انداز طبیعی
متوسط (منفی)	کم (منفی)	تفریح و سرگرمی
متوسط (منفی)	متوسط (منفی)	محیط طبیعی
ناچیز	کم (منفی)	شکار
متوسط (منفی)	کم (منفی)	ماهیان
ناچیز	کم (مثبت)	منابع طبیعی
کم (منفی)	کم (منفی)	کیفیت آب، عرضه آب و آلودگی آب

بررسی و تحلیل آثار محیط زیستی احداث واحدهای برقایی بزرگ و کوچک بر اساس آنچه در جدول ۵ بیان شده است، سبب ایجاد تصویر شفافی به منظور تصمیم‌گیری در خصوص انتخاب مقیاس نیروگاه‌های برقایی می‌شود. اگرچه احداث واحدهای برقایی به صورت کلی بر شاخص‌های محیط زیستی تأثیر منفی می‌گذارند، تفاوت در میزان تأثیرگذاری با توجه به مقیاس نیروگاه‌ها متفاوت است. مقایسه شاخص‌های تأثیرپذیر محیط زیستی ناشی از احداث واحدهای برقایی کوچک و بزرگ، بیشتر به ترجیحات و تصمیم‌های سیاستگذاران مرتبط است. به این معنا که تأثیرپذیری کمتر کدام یک (یا ترکیبی) از شاخص‌های محیط زیستی ناشی از احداث واحدهای نیروگاهی برقایی در اولویت قرار می‌گیرد. بر اساس جدول ۵ و بدون در نظر گرفتن شاخص‌های محیط زیستی اولویت‌دار، احداث واحدهای برقایی بزرگ سبب تغییرات بیشتری (به صورت منفی) بر دمای آب نسبت به احداث واحدهای برقایی کوچک می‌شود. بنابراین، احداث واحدهای نیروگاهی برقایی کوچک در مناطقی که افزایش دمای آب موجب آسیب دیدن موجودات زنده درون آب می‌شود، می‌تواند نسبت به احداث واحدهای نیروگاهی برقایی بزرگ ارجحیت داشته باشد. اقلیم منطقه از طریق احداث واحدهای برقایی بزرگ تحت تأثیرات منفی زیادی قرار می‌گیرد. مهم‌ترین دلایل آن می‌تواند احداث سد و زیرساخت‌های مورد نیاز نیروگاه بزرگ مقیاس آبی باشد در حالی که نیروگاه‌های برقایی کوچک تأثیرات منفی به مراتب کمتری بر اقلیم منطقه خواهند گذاشت. تأثیرات منفی بر اقلیم منطقه می‌تواند شامل زیر آب رفتن زمین‌های مرغوب کشاورزی، تخریب زیستگاه‌های حیوانات بومی، از بین رفتن محل رویش برخی گونه‌های گیاهی و حتی تغییر در میزان رطوبت منطقه به دلیل تبخیر آب پشت سد در مناطق گرمسیری شود. تنها شاخص محیط زیستی که از طریق احداث واحدهای برقایی به صورت مثبت تحت تأثیر قرار می‌گیرد، شاخص منابع طبیعی است. این شاخص بیان‌کننده استفاده از آب ذخیره‌شده پشت سدها از طریق توسعه آب‌رسانی به مناطق کم‌آب و کنترل سیلاب‌هاست. بنابراین، با توجه به ضرورت احداث سد به منظور تولید برق در نیروگاه‌های برقایی بزرگ، این شاخص به صورت مثبت تحت تأثیر قرار می‌گیرد و احداث نیروگاه‌های برقایی کوچک به میزان ناچیزی این شاخص را تحت تأثیر قرار می‌دهد. بر

اساس جدول ۵، میزان تأثیر احداث واحدهای برقایی بزرگ و کوچک بر سایر شاخص‌های محیط زیستی مانند کیفیت و آلودگی آب، محیط طبیعی و چشم‌انداز طبیعی تقریباً به صورت یکسان است. از بررسی شاخص‌های محیط زیستی ناشی از احداث واحدهای برقایی می‌توان به این نتیجه دست یافت که آثار منفی بر محیط زیست اجتناب‌ناپذیر است و باید تلاش کرد که میزان آنها حداقل شود. از سوی دیگر، به کارگیری تصمیم در خصوص احداث واحدهای بزرگ یا کوچک مقیاس منوط به اولویت‌بندی شاخص‌های تأثیرپذیری محیط زیستی و سایر ملاحظات سیاستگذاران است. به این منظور، انجام ارزیابی تأثیرات زیست‌محیطی طرح با در نظر گرفتن همه شاخص‌ها ضروری است. با وجود این، اگر دو شاخص افزایش دمای آب و فرسایش خاک به عنوان شاخص‌های مهم و عمده زیست‌محیطی تأثیرپذیر ناشی از احداث واحدهای برقایی در نظر گرفته شوند، توسعه نیروگاه‌های برقایی کوچک تأثیرات منفی کمتری نسبت به واحدهای برقایی بزرگ بر این شاخص‌ها خواهند داشت.

### جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

توسعه نیروگاه‌های برقایی کوچک می‌تواند از طریق ایجاد شبکه‌های مستقل و کوچک‌تر، سبب بهبود امنیت انرژی به لحاظ تولید پراکنده انرژی الکتریکی شود و همچنین دسترسی مناطق دورافتاده به انرژی الکتریکی با هزینه کمتری را فراهم کند. اگرچه کم‌بودن هزینه تولید توان در نیروگاه‌های نصب‌شده واحدهای برقایی بزرگ نسبت به واحدهای برقایی کوچک، فقط به عنوان یک مزیت نسبی مطرح است؛ همین مورد سبب ایجاد مشکل در تأمین مالی نیروگاه‌های برقایی بزرگ شده است. بنابراین، نبود منابع مالی کافی خود موجب طولانی‌شدن دوره ساخت و به دنبال آن افزایش هزینه‌های کلی می‌شود. از سوی دیگر، اهمیت روزافزون توجه به شاخص‌های محیط زیستی علاوه بر شاخص‌های اقتصادی، سبب تغییر رویکرد جهانی از احداث واحدهای نیروگاه‌های برقایی بزرگ به سمت نیروگاه‌های برقایی کوچک شده است.

جست‌وجوی روش‌های اقتصادی مناسب‌تر و معرفی الگوهای جدید برای دست‌یافتن به فناوری‌های برتر و مدرن در زمینه تبدیل منابع انرژی تجدیدپذیر به انرژی‌های قابل

استفاده شده برای ارزیابی احداث واحدهای برقابی کوچک بر شرایط زیست‌محیطی هر منطقه، می‌تواند بر تصمیم سیاستگذاران و مجریان تأثیر بسزایی داشته باشد.

#### منابع

- [1]. Renewable energy policy network for the 21<sup>st</sup> century (REN21). Renewables 2016: global status report. REN21 secretariat. France. 2017.
- [2]. Koutsoyiannis D. Water Crisis: From Conflict to Cooperation, Scale of water resources development and sustainability: small is beautiful, large is great. Department of Water Resources and Environmental Engineering. Faculty of Civil Engineering. National Technical University of Athens. Greece; 2011.
- [3]. Bakken H, Guri Aase A, Hagen D, Sundt H, Barton ND, Lujala P. Demonstrating a new framework for the comparison of environmental impacts from small- and large-scale hydropower and wind power projects. *Journal of Environmental Management*; 2014. 140: 93-101.
- [4]. Adhau P. Economic Analysis and Application of Small Micro/Hydro Power Plants. International Conference on Renewable Energies and Power Quality. Valencia. 2009; 15th to 17th April.
- [5]. Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York. USA; 2011.
- [6]. World Energy Resources. Charting the upsurge in hydropower development. London; 2015. ([https://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2015/05/World-Energy-Resources\\_Charting-the-Upsurge-in-Hydropower-Development\\_2015\\_Report2.pdf](https://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2015/05/World-Energy-Resources_Charting-the-Upsurge-in-Hydropower-Development_2015_Report2.pdf)); [accessed 08.05.16]
- [7]. Liu H, Masera D, Esser L. World Small Hydropower Development Report. Editors. United Nations Industrial Development Organization; International Center on Small Hydro Power. Available from [www.smallhydroworld.org](http://www.smallhydroworld.org); 2016 [accessed 07.05.2016].
- [8]. Ministry of Energy. Iran Energy Balance; 1393. [Persian].
- [9]. Iran water & power Resources Development Company (1396), <http://en.iwpc.ir/PMS/default.aspx>. 5.8.2017.
- [10]. Vermaak HJ, Kusakana K, Koko SP. Status of micro-hydrokinetic river technology in rural applications: a review of literature. *Renew Sustain Energy Review*; 2014. 29:625-33.

استحصال اهمیت بسیار زیادی دارد. با توجه به شرایط خاص جغرافیایی کشور برای احداث نیروگاه‌های مناسب برقابی کوچک، می‌توان به دلایل زیر به عنوان پیشران‌های توسعه این صنعت در کشور اشاره کرد: تجدیدپذیر بودن انرژی برقابی، کم بودن قیمت تمام شده برقابی‌های کوچک، سرعت در نصب و بهره‌برداری نسبت به نیروگاه‌های برقابی بزرگ، کمترین مشکلات اجتماعی و آسیب‌های زیست‌محیطی هنگام اجرا و بهره‌برداری، توجیه اقتصادی تولید توان، امکان اجرا با پراکندگی مناسب در سطح کشور، توانمندی فناوری در داخل کشور، قابلیت مناسب برای سرمایه‌گذاری بخش خصوصی، امکان احداث در مناطق روستایی کمتر توسعه یافته و ایجاد فرصت‌های شغلی و درآمد پایدار در این مناطق و از همه مهم‌تر کاهش تلفات شبکه توزیع.

بررسی و مقایسه شاخص‌های زیست‌محیطی انجام شده در این پژوهش، تأیید می‌کند که می‌توان از طریق احداث واحدهای نیروگاهی برقابی کوچک، ملاحظات محیط زیستی اجرای طرح‌های نیروگاهی را به صورت بهتری محقق کرد. شاخص‌هایی مانند دمای آب، کیفیت آب، اقلیم منطقه و تخریب محیط طبیعی از طریق احداث طرح‌های نیروگاهی برقابی کوچک دچار تغییرات بسیار کمتری نسبت به احداث واحدهای برقابی بزرگ می‌شود. بنابراین، علاوه بر توجیه‌پذیری اقتصادی نیروگاه‌های برقابی کوچک با توجه به هزینه‌های سرمایه‌گذاری کمتر، شاخص‌های محیط زیستی نیز سبب توسعه آنها شده است.

ایران در مقایسه با کشورهای مختلف فقط به میزان ۴۹ مگاوات پتانسیل احداث واحدهای برقابی کوچک را دارد که تا کنون حدود ۳۵ درصد آن به صورت ظرفیت‌های نصب شده محقق شده است. برنامه‌ریزی‌های موجود در کشور بیان می‌کند که می‌توان تا ۹۵ درصد از پتانسیل موجود در کشور را بهره‌برداری کرد. به این منظور می‌توان به ملاحظات محیط زیستی به‌عنوان یکی از عوامل تأثیرگذار به همراه محدودیت‌های اقتصادی، در مطالعات و بررسی‌های اولیه احداث واحدهای برقابی کوچک توجه کرد. با آنکه تا کنون عوامل تعیین‌کننده در اجرای واحدهای نیروگاهی برقابی، اولویت داشتن میزان دسترسی به منابع مالی و در نظر گرفتن شرایط اقتصادی بر وضعیت و ملاحظات زیست‌محیطی بوده است، بررسی تجربیات سایر کشورها و شاخص‌های تعیین‌کننده محیط زیستی

- [11]. Choulot A. Energy recovery in existing infrastructures with small hydropower plants. FP6 Project Shapes (Work Package 5—WP5); 2010.
- [12]. Brown A, Müller S, Dobrotková Z. Renewable energy markets and prospects by technology. ([https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Renew\\_Tech.pdf](https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Renew_Tech.pdf)); 2011 [accessed 20.04.16].
- [13]. Shahmohammadi S. Yusuff RB. Shakouri H. Sadat M, Keyhanian S. Long term policy analysis of Malaysia's renewable energy fund budget: a system dynamics approach. System Dynamics Conference; 2014.
- [14]. Climate change. USA. (<http://www.americanrivers.org/initiatives/dams/hydropower/climate/>); 2016 [accessed 09.05.16].
- [15]. IEA (International Energy Agency). Annual report; 2012.
- [16]. IRENA( International Renewable Energy Agency). Renewable energy technologies: cost analysis series. Hydropower: IRENA. ([http://www.irena.org/documentdownloads/publications/re\\_technologies\\_cost\\_analysis-hydropower.pdf](http://www.irena.org/documentdownloads/publications/re_technologies_cost_analysis-hydropower.pdf)); 2012 [accessed 03.05.16]
- [17]. European Sustainable Electricity; Comprehensive Analysis of Future European Demand and Generation of European Electricity and its Security of Supply. The European Union;
- [18]. Håkon S, Ruud A, Harby A. Development of small versus large hydropower in Norway comparison of environmental impacts. Energy Procedia; 2012. 185 – 199.
- [19]. Forseth T. Outcome of Trollheim power plant in July 2008: effects on fish stocks in Surna. Norwegian Institute for Nature Research, Trondheim; 2009.
- [20]. Sundt H, Hallaraker J.H, Alfredsen K.T, Svelle K. 2006. Optimization of fishing conditions and power generation in Surna - Partial report on river basins, watertight area and hydraulic conditions relevant to salmonids. SINTEF Energy, Trondheim; 2006.