ارزیابی اقتصادی توسعه‌ی راکتورهای ماژولار جهت تولید برق

INC29-1227

هادی ابراهیم‌گل[۱]، زهرا شهبازی‌راد[۱و*]، محمدجواد صفری[۲]

دانشکده‌ی مهندسی هسته‌ای، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
دانشکده فیزیک و مهندسی انرژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ایران

چکیده:

یکی از موانع اصلی توسعه‌ی نیروگاه‌های هسته‌ای، سرمایه‌گذاری اولیه‌ی بالا جهت ساخت و ریسک مالی قابل توجه برای سرمایه‌گذار می‌باشد. از این‌رو، در دو دهه‌ی گذشته، توسعه‌ی راکتورهای ماژولار کوچک جهت غلبه بر این موانع در بسیاری از کشورها مورد توجه قرار گرفته است. به طور کلی، عامل کلیدی در توسعه‌ی راکتورهای ماژولار کوچک، برآورده کردن نیاز تولید انعطاف‌پذیر توان برای گستره‌ای از کاربردها می‌باشد؛ به طوری که می‌توان با میزان سرمایه‌گذاری کمتر در حین ساخت، بهره‌وری اقتصادی بیشتری را به دست آورد. در این مطالعه به ارزیابی اقتصادی دو راکتور دریا-پایه و زمین-پایه برای تولید انعطاف‌پذیر انرژی پرداخته شده است و در انتها نیز مقایسه‌ی اقتصادی بین دو راکتور بزرگ با فناوری جدید (هوالونگ وان چینی و وی وی ای آر-۱۲۰۰)، راکتور ماژولار شناور روسیه (KLT-s) و یک راکتور ماژولار گازی دما بالا متعلق به چین (HTR-PM) انجام شد که در نتیجه، رقابت اقتصادی بین بازار راکتورهای بزرگ جدید و ماژولار نمایان گردید.

کلیدواژه‌ها: راکتور ماژولار، نیروگاه هسته‌ای، ارزیابی اقتصادی، هزینه تراز شده‌ی انرژی.

Economic analysis of modular reactors for electricity generation

Hadi Ebrahimgol[1], Zahra Shahbazi Rad[1*], Mohammad Javad Safari[2]

Faculty of Nuclear Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.
Physics and Energy Engineering Faculty, Amir Kabir University, Tehran. Iran

Abstract:

One of the main obstacles to the development of nuclear power plants is the high initial investment for construction and significant financial risk for the investor. Therefore, in the last two decades, the development of small modular reactors has been considered in many countries to overcome these obstacles. In general, the key factor in the development of small modular reactors is to meet the need for flexible power generation for a range of applications; So that you can get more economic productivity with less investment during construction. In this study, the economic evaluation of two sea-base and land-based reactors for flexible energy production is discussed, and at the end, an economic comparison between two large reactors with new technology (China's Halong Van and VVER-1200), modular reactor Russian floating (KLT-s) and a Chinese modular high-temperature gas reactor (HTR-PM) were carried out, which resulted in economic competition between the market of large new and modular reactors.

Keywords: SMR reactor, Nuclear power plant, economic analysis, LCOE.

۱. مقدمه

از لحاظ تاریخی، اولین راکتورهای هسته‌ای برای تولید تجاری برق، اندازه‌ی کوچکی داشتند، که نتیجه‌ی فرآیند مهندسی محافظه‌کارانه‌ی ساخت نیروگاه‌های جدید بود تا تجربه‌ی ساخت و عملیاتی مورد نیاز برای احداث نیروگاه‌های با مقیاس بزرگتر و با ضریب اطمینان بیشتر به دست آید. اکنون پس از نیم قرن تجربه، راکتورهای تجاری بزرگ با توان الکتریکی تا ۱۶۶۰ مگاوات در بسیاری از نقاط جهان مستقر شده‌اند. علاوه بر این، واحدهای کوچک هسته‌ای نیز برای استقرار زمینی و دریایی ساخته شده‌اند تا برق را برای سایت‌های نظامی و مناطق دورافتاده تأمین کنند.

راکتورهای ماژولار کوچک[1]، نسل جدیدتری از راکتورهای هسته‌ای برای تولید توان الکتریکی تا ۳۰۰ مگاوات به صورت معمول می‌باشند. اجزا و سیستم‌های این نوع فناوری می‌تواند در کارخانه ساخته شده و سپس به عنوان بسته‌هایی به مناطق مورد تقاضا منتقل شده و نصب گردند.

سرمایه‌گذاری اولیه‌ی بالا برای ساخت یک نیروگاه توان هسته‌ای، ریسک مالی قابل توجه برای سرمایه‌گذار از جمله معایب نیروگاه‌های بزرگ هسته‌ای می‌باشد. یافته‌ها نشان می‌دهد که راکتورهای کوچک ماژولار می‌توانند در کوتاه‌مدت تا میان‌مدت به‌صورت تجاری مستقر شوند، و فرصت‌هایی را برای کاهش بیشتر هزینه‌ها از طریق صرفه‌جویی و نوآوری‌های جدید ایجاد کنند.

چشم‌انداز آینده‌ی صنعت هسته‌ای شامل توسعه‌ی راکتورهای توان نامی کوچک متشکل از یک یا چند واحد (ماژول) با خصوصیاتی مطابق با بازارهای شبکه‌های برق‌رسانی کوچک یا بزرگ است که در نتیجه، منجر به کاهش قابل توجه نرخ سرمایه‌گذاری خواهد شد.

در این مطالعه، پس از معرفی یک روش ارزیابی اقتصادی، به امکان‌سنجی راه‌اندازی دو راکتور دریا-پایه و زمین-پایه برای تولید انعطاف‌پذیر انرژی از دیدگاه اقتصادی پرداخته می‌شود. راکتورهای ماژولار انتخاب شده شامل: راکتور ماژولار هسته‌ای شناور روسیه (KLT-S) و یک راکتور ماژولار گازی دما بالا متعلق به چین (HTR-PM) می‌باشد. در انتها نیز رقابت اقتصادی بین دو راکتور بزرگ و جدید هوالونگ وان چینی و وی وی ای آر-۱۲۰۰ روسی با راکتورهای ماژولار منتخب انجام خواهد شد تا رقابت بین بازار راکتورهای بزرگ جدید و ماژولار نمایان گردد.

۲. روش‌شناسی ارزیابی اقتصادی

محاسبه‌ی هزینه تمام شده‌ی انرژی برای هر فناوری تولید برق، یکی از روش‌های امکان‌سنجی و تحلیل اقتصادی هر فناوری تولید توان الکتریکی می‌باشد. در این رویکرد کلیه‌ی هزینه‌های طرح شامل: هزینه‌های دوره‌ی اجرا و بهره‌برداری در محاسبه هزینه‌ی نهائی منظور می‌شوند. لازم به ذکر است به علت وقوع هزینه‌ها در سال‌های متفاوت و لزوم منظور نمودن ارزش زمانی پول در هزینه‌ی نهائی، با استفاده از روش‌های اقتصاد مهندسی، کلیه‌ی هزینه‌ها به قیمت سال مبنا تبدیل شده و در محاسبات وارد می‌شوند[۱].

هزینه‌ی تراز شده انرژی (برق)[2] روشی مبتنی بر محاسبه‌ی ارزش فعلی هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری تولید برق در کل دوره عمر پروژه می‌باشد که در آن تولید یک کیلووات ساعت برق از تقسیم کردن ارزش فعلی کل هزینه‌های انجام شده برای تولید برق محاسبه می‌شود که از رابطه‌ی (۱) بدست می‌آید[۲]:

$$LCOE = \frac{\sum_{1}^{n} I_t + (O\&M)_t + Fuel_t}{\sum_{1}^{n} E_t} \qquad (۱)$$

ارزش فعلی هزینه‌ی سرمایه‌گذاری برای هر فناوری تولید برق از رابطه‌ی (۲) بدست می‌آید:

[1] Small modular reactor
[2] Levelized Cost of Energy (Electricity)

$$I_t = I_{tot} \times \frac{i \times (1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \qquad (۲)$$

که در آن I_{tot} هزینه‌ی کل سرمایه‌گذاری برای هر فناوری تولید برق در مدت زمان مورد استفاده از آن می‌باشد که معمولاً برحسب دلار بر کیلووات بیان می‌گردد. همچنین i نرخ تنزیل برحسب درصد می‌باشد.

در علم اقتصاد، پول دارای ارزش است که با مرور زمان دچار تغییر می‌شود. در واقع پول در هر مقطع دارای ارزش فعلی است که با هر نرخ تنزیلی در پرداخت‌ها و یا دریافت‌ها تغییر می‌کند. بر این اساس با کمک فرمول‌ها و روش‌هایی اقدام به محاسبه‌ی ارزش پول در در زمان حال می‌کنند. این ارزش زمانی پول برای تمامی ارزها قابل تعریف می‌باشد ولی به جهت ارزیابی با سایر پروژه‌ها و همچنین نرخ تغییرات کمتر، معمولاً براساس ارزهای دلار و یورو محاسبه می‌شود.

هزینه‌های تعمیرات و نگهداری یک نیروگاه توان هسته‌ای شامل: تمام هزینه‌های سالانه‌ی غیرسوختی مانند: حقوق کارکنان نیروگاه، خدمات و اقلام خریداری شده برای فعالیت نیروگاه می‌باشد[۳].

هزینه‌ی سوخت، مجموع تمام فعالیت‌های مربوط به چرخه‌ی سوخت هسته‌ای از استخراج سنگ معدن اورانیوم تا دفع نهایی زباله‌های سطح بالا می‌باشد[۴]. غنی‌سازی اورانیوم، ساخت سوخت هسته‌ای، بازفرآوری سوخت مصرف‌شده و سایر تحقیقات مرتبط با فعالیت‌های چرخه‌ی سوخت هسته‌ای، نمونه‌هایی از این دسته هزینه‌ها می‌باشند[۵].

۳. مطالعه‌ی موردی محاسبه‌ی هزینه‌ی هم‌تراز شده برق برای چند راکتور هسته‌ای ماژولار پیشرفته

توسعه‌ی راکتورهای ماژولار کوچک به عنوان جایگزینی ساده‌تر و ایمن‌تر برای راکتورهای هسته‌ای بزرگ مورد توجه واقع شده است[۶]. با وجود تعداد زیادی از طرح‌های پیشنهادی توسط سازندگان مختلف این فناوری، در این مطالعه راکتورهای ماژولار یکپارچه‌ی کِی اِل تی -۴۰ اِس و اِچ تی آر-پی اِم به عنوان راکتورهایی که به مرحله‌ی بهره‌برداری رسیده‌اند به عنوان گزینه‌های ارزیابی اقتصادی انتخاب شده‌اند. راکتور شناور پیشرفته‌ی روسی کِی اِل تی -۴۰ اِس مبتنی بر فناوری راکتور آب تحت فشار یکپارچه[۳] می‌باشد. مفهومی که با توجه به هزینه، ایمنی و نگرانی‌های نظارتی توسعه یافته است[۷]. بعضی از محققان از فناوری راکتور آب تحت فشار یکپارچه به عنوان یک مفهوم جدید و اثبات نشده انتقاد کرده‌اند، در حالی که توسعه‌ی راکتورهای آب تحت فشار یکپارچه به دهه ۱۹۶۰ (و یا احتمالاً زودتر) برمی‌گردد، زمانی که شرکت بابکوک و ویلکوکس[۴] مفهوم طرح مولد بخار هسته‌ای تلفیقی[۵] را برای یک راکتور کشتی تجاری به کمیسیون انرژی اتمی آمریکا ارائه نمود[۸].

در سال ۱۹۹۲، دولت مرکزی چین ساخت یک راکتور آزمایشی از نوع گازی دما بالا با سوخت بستر گلوله‌ای[۶] را با نام اِچ‌تی آر-پی اِم در مؤسسه فناوری هسته‌ای و انرژی‌های جدید دانشگاه سینگهوا[۷] تصویب کرد. در سال ۲۰۰۳، این راکتور به توان کامل خود رسید و پس از آن، آزمایش‌های زیادی به روی این راکتور برای تأیید ویژگی‌های ایمنی ذاتی مهم ماژولار انجام شد[۹]. این نیروگاه دارای دو راکتور کوچک است که یک توربین ۲۱۰ مگاواتی را به حرکت در می آورد. در اواخر سال ۲۰۲۱، راکتورها پس از رسیدن به حالت بحرانی، به شبکه‌ی برق دولتی متصل شدند.

کِی اِل تی -۴۰ اِس یک راکتور آب تحت فشار است که برای یک نیروگاه هسته‌ای شناور[۸] ساخته شده است تا ظرفیت ۳۵ مگاوات الکتریکی را در هر ماژول فراهم کند. طراحی پیشرفته‌ی این راکتور عملکرد طولانی‌مدت ناوهای یخشکن هسته‌ای را در شرایط سخت‌تر در مقایسه با نیروگاه هسته‌ای ثابت فراهم می‌کند. نیروگاه هسته‌ای شناور مجهز به راکتور کِی اِل تی -۴۰ اِس را می‌توان در کارخانه‌های کشتی‌سازی ساخت و به طور کامل مونتاژ، آزمایش شده و آماده‌ی بهره‌برداری به سایت‌های نصب تحویل داد. در این فناوری، نیازی به توسعه‌ی پیوندهای حمل و نقل، خطوط انتقال نیرو

[3] iPWR
[4] Babcock and Wilcox
[5] Consolidated Nuclear Steam Generator
[6] Pebble bed fuel
[7] Tsinghua University's Institute of Nuclear and New Energy Technology (INET).
[8] FNPP

یا زیرساخت‌های مورد نیاز برای نیروگاه‌های زمین-پایه نیست و درجه‌ی آزادی بالایی در انتخاب مکان را برای نیروگاه فراهم می‌سازد.

این نیروگاه شناور، برای ارائه‌ی قابلیت‌های تولید برق و تأمین گرما برای مصرف‌کنندگان در مناطق دورافتاده بدون منبع تغذیه‌ی متمرکز در نظر گرفته شده است. علاوه بر این، این نیروگاه را می‌توان برای شیرین‌سازی آب دریا و همچنین به عنوان منبع تغذیه‌ی مستقل برای سکوهای تولید نفت در دریا استفاده کرد.

همان‌طور که بیان شد یکی از مناسب‌ترین روش‌های سنجش و تعیین هزینه‌ی نهایی تولید انرژی الکتریکی، استفاده از الگوریتم هزینه‌ی تراز شده برق می‌باشد. به طوری که در حال حاضر در بسیاری از کشورهای اروپایی و آمریکا مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این بخش به پیاده‌سازی این روش برای چهار فناوری منتخب تولید برق شامل: دو راکتور هسته‌ای ماژولار و دو راکتور هسته‌ای بزرگ با فناوری پیشرفته خواهیم پرداخت.

از آنجا که هزینه‌ی هم‌ترازشده معیار اندازه‌گیری تولید برق در چرخه عمر نیروگاه است، لذا می بایست تمام هزینه ها را در محاسبه‌ی هزینه نهایی در نظر گرفت. جهت محاسبه‌ی این مؤلفه‌ها به اطلاعاتی از قبیل داده‌های عملیاتی نیروگاه، هزینه‌ی ساخت و اجرای نیروگاه، مؤلفه‌های انرژی و اقتصادی نیاز است. در جدول (۱) مشخصات فنی و اقتصادی این راکتورها جهت محاسبه‌ی هزینه هم‌تراز شده‌ی برق ارائه شده است.

جدول ۱. مشخصات فنی، اقتصادی و نتایج محاسبات الگوریتم هزینه همترازشده انرژی [۱۰].

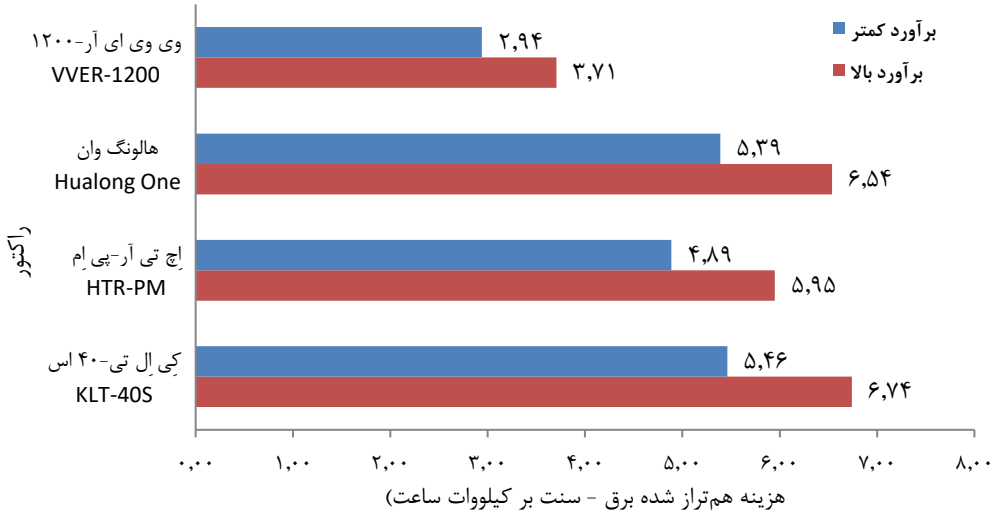
مؤلفه	کِی اِل تی-۴۰اِس	اِچ تی آر-پی اِم	هوالونگ وان	وی وی ای آر-۱۲۰۰
هزینه‌ی سرمایه‌گذاری ($/kWe)	۳۳۱۴	۳۲۷۰	۳۵۰۰	۲۱۰۰
هزینه‌ی تعمیر و نگه‌داری ($/kWe-y)	۱۶۶	۱۶۴	۱۷۵	۱۰۵
هزینه سوخت ($ /kWh)	۹/۳۳	۹/۳۳	۹/۳۳	۵
توان حرارتی (MWth)	۱۵۰	۵۰۰	۳۰۵۰	۳۲۱۲
توان الکتریکی (MWe)	۳۵	۲۱۰	۱۰۰۰	۱۲۰۰
بازده نیروگاه (٪)	۲۳/۳	۴۲	۳۶	۳۴/۸
زمان ساخت (y)	۴	۵	۶	۴/۵
ضریب دسترسی (٪)	۰/۸۵	۰/۹۵	۰/۸۹	۰/۹
عمر نیروگاه (y)	۴۰	۴۰	۴۰	۶۰

در این مطالعه، از دو سناریوی برآورد پایین و برآورد بالا برای تحلیل اقتصادی نیروگاه‌های ماژولار و نیروگاه‌های توان هسته‌ای جدید استفاده شده است که مولفه‌های این سناریوها در جدول (۲) ارائه شده است. نرخ تنزیل یک رویه‌ی استاندارد مالی است که در اکثر تحلیل‌های زمانی در حوزه‌ی اقتصاد مورد استفاده قرار می‌گیرد و معیاری از کاهش ارزش پول می‌باشد. در این مطالعه برای بررسی هزینه‌ی پروژه، از دو نرخ تنزیل بالا (برآورد بیشتر) و پایین (برآورد کمتر) استفاده شده است تا محدوده‌ای برای هزینه‌ی ساخت پروژه تعیین شود.

جدول ۲. مشخصات فنی، اقتصادی و نتایج محاسبات الگوریتم هزینه همترازشده

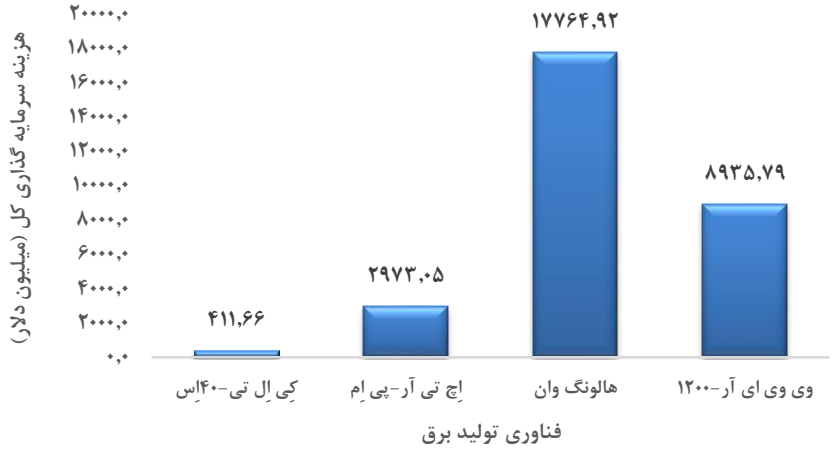
مؤلفه	کِی اِل تی-۴۰اِس		اِچ تی آر-پی اِم		هوالونگ وان		وی وی ای آر-۱۲۰۰	
	برآورد پایین	برآورد بالا	برآورد پایین	برآورد بالا	برآورد پایین	برآورد بالا	برآورد پایین	برآورد بالا
زمان ساخت (y)	۴	۵	۵	۶	۶	۷	۴/۵	۵/۵
هزینه‌ی سرمایه گذاری ($/kWe)	۳۳۱۴	۴۰۰۰	۳۲۷۰	۴۰۰۰	۳۵۰۰	۴۲۰۰	۲۱۰۰	۲۵۰۰
نرخ تنزیل(%)	۵	۸	۵	۸	۵	۸	۵	۸

همانطور که در شکل (۱) نمایش داده شده است، برای سناریوی برآورد پایین، راکتور ماژولار گازی دما بالای اِچ تی آر-پی اِم با هزینه‌ی هم‌تراز شده‌ی انرژی ۴/۸۹ سنت بر کیلووات ساعت نسبت به راکتور ماژولار آب تحت فشار کِی اِل تی-۴۰ اِس حدود ۱۰/۵ درصد کاهش و در مقایسه با نیروگاه توان هسته‌ای هوالونگ‌وان حدود ۹ درصد کاهش هزینه‌ی ساخت خواهد داشت. راکتور دریا-پایه‌ی کِی اِل تی- ۴۰ اِس نیز در مقایسه با نیروگاه توان هسته‌ای هوالونگ‌وان تنها حدود ۱/۵ درصد افزایش هزینه‌ی ساخت خواهد داشت در صورتی‌که این فناوری قابلیت برق‌رسانی به نقاط دوردست و مناطق استراتژیک را دارد. در جامعه آماری مورد نظر در این پژوهش، نیروگاه توان هسته‌ای وی وی ای آر-۱۲۰۰ نیز با هزینه‌ی هم‌تراز شده‌ی انرژی ۳/۷۱ سنت بر کیلووات، بهترین گزینه برای تولید برق در معیار بزرگ می‌باشد.



شکل ۱. هزینه هم‌تراز شده برق برای فناوری راکتورهای ماژولار و نیروگاه بزرگ توان

در شکل (۲)، هزینه‌ی ساخت نیروگاه‌های توان هسته‌ای بزرگ و ماژولار نمایش داده شده است. در این مقایسه، نیروگاه وی وی ای آر-۱۲۰۰ با هزینه‌ی سرمایه‌گذاری حدود ۹۰۰۰ میلیون دلار، تقریباً نصف هزینه‌ی نیروگاه توان هسته‌ای هوالونگ وان را خواهد داشت. هزینه‌ی سرمایه‌گذاری برای راکتور ماژولار دریا-پایه‌ی کِی اِل تی- ۴۰ اِس با توان الکتریکی ۲۱۰ مگاوات حدود ۴۱۱/۶۶ میلیون دلار و برای راکتور ماژولار گازی دما بالای اِچ تی آر-پی اِم با توان الکتریکی ۳۵ مگاوات حدود ۲۹۷۳/۰۵ میلیون دلار خواهد بود.



شکل ۲. هزینه سرمایه‌گذاری ساخت فناوری‌های هسته‌ای منتخب تولید برق

۴. نتیجه‌گیری

یکی از عوامل کلیدی در توسعه‌ی راکتورهای ماژولار کوچک، برآورده کردن نیاز برای تولید انعطاف‌پذیر توان برای گستره‌ای از کاربردها می‌باشد به طوری که می‌توان با میزان سرمایه‌گذاری کمتر حین ساخت جنبه‌ی اقتصادی بهتری را پیشنهاد داد. در این مطالعه، یک راکتور ماژولار زمین-پایه و یک راکتور ماژولار دریا-پایه با فناوری پیشرفته که به مرحله‌ی بهره‌برداری رسیده‌اند به عنوان گزینه‌های تولید توان انتخاب شده‌اند تا ابعاد اقتصادی آن‌ها در مقایسه با نیروگاه‌های توان هسته‌ای بزرگ بررسی شود. براساس نتایج بدست آمده، راکتور ماژولار گازی دما بالای اِچ تی آر-پی اِم حدود ۱۰/۵ درصد هزینه‌ی ساخت (هزینه‌ی هم‌ترازشده انرژی) کمتری نسبت به راکتور کِی اِل تی-۴۰ اِس دارد. همچنین هزینه‌ی ساخت فناوری راکتور ماژولار اِچ تی آر-پی اِم در مقایسه با نیروگاه توان هسته‌ای هوالونگ‌وان حدود ۹ درصد کمتر خواهد شد. نیروگاه وی وی ای آر-۱۲۰۰ نیز با هزینه‌ی سرمایه‌گذاری حدود ۹ میلیارد دلاری بهترین گزینه برای تولید برق با معیار بزرگ می‌باشد.

۵. علایم و نشانه‌ها

LCOE	هزینه یکنواخت یا هم‌تراز شده (cent/kWh)
I_t	هزینه سرمایه گذاری به قیمت روز ($/kWh)
$(O\&M)_t$	هزینه بهره برداری و تعمیر و نگهداری ($/kWh)
$Fuel_t$	هزینه سوخت ($/kWh)
E_t	برق تولید سالانه (kWh/y)
n	عمر اقتصادی نیروگاه (y)

۶. مراجع

1. K., Haidari, pricing of energy and services of hydroelectric power plants based on a scientific logic, Iran Water Resources Management Company, (In Persian).

2. S., Mahmoodi, H., Berahmandpour, K., Haidari, Determination of the total price of electricity based on the proposed algorithm in accordance with different technologies and its case study in Iran, (In Persian).

3. GIF/EMWG, . Cost Estimating Guidelines for Generation IV Nuclear Energy Systems .

4. NEA, . The Economics of the Nuclear Fuel Cycle.

5. IAEA, . IAEA Safety Glossary.

6. Nian, V., Chou, S.K., . The state of nuclear power two years after Fukushima – the ASEAN perspective. Appl. Energy, 36, (2014) 838-848.

7. Hidayatullah, H., Susyadi, S., Subki, M.H., Design and technology development for small modular reactors – safety expectations, prospects and impediments of their deployment. Prog. Nucl. Energy, 79 (2015) 127-135.

8. Babcock & Wilcox Company, . The CNSG II - A Conceptual Merchant Ship Nuclear Reactor Design. The Babcock & Wilcox Company, USA.

9. Advances in Small Modular Reactor Technology Developments, IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS), Edition.

10. V., Nian and S., Zhong, Economic feasibility of flexible energy productions by small modular reactors from the perspective of integrated planning, Progress in Nuclear Energy, Volume 118, 2020.