**اقتصاد راکتورهای هسته ای کوچک**

تاریخ وصول : تاریخ پذیرش:

**چکیده:**

 مقاله حال حاضر به بررسی اقتصاد راکتورهای کوچک هسته ای می پردازد. ابتدا از تعریف این راکتورها شروع کرده و سپس به دیدگاه های بازار نسبت به این راکتورها میپردازیم؛ و در ادامه به بررسی دلایل برتری اقتصادی این راکتورها نسبت به راکتورهای بزرگ هسته ای میپردازیم. همچنین این مقاله نگاهی ویژه ای به عوامل بسیار مهم جذب سرمایه این گونه پروژه ها از جمله سرمایه اولیه، زمان اجرای پروژه، ماکزیمم هزینه های نقدی، هزینه کل ساخت و ریسک پایین سرمایه گذاری دارد. مهمترین بخش این مقاله به بررسی ویژگی های اقتصادی در روند تولید این نوع از راکتورها و ویژگیهای خاصی از این راکتورها که تاثیر بسیار مستقیم و قابل توجهی بر اقتصاد انها دارد از جمله طراحی خاص، چگالی کم قطعات و نیروگاه، همگام سازی واحد ها، هماهنگی با نیاز بازار، ساخت و ساز صنعتی راکتور و قطعات ان، تولید انبوه، ساده سازی در طراحی و دیگر ویژگی های موثر میپردازد؛ در واقع ویژگی های فنی و مهندسی خاص این نوع از راکتورها باعث میشود تا عوامل بالا بتوانند در اقتصاد راکتورهای کوچک تاثیر گذار باشند. قابل ذکر است مطالب موجود در این مقاله قابل استفاده در تمامی کشورهایی که تمایل به سرمایه گذاری در این حوزه دارند میتواند بسیار مفید باشد. همچنین شاخص ها و شیوه های استفاده شده در این مقاله میتواند برای بررسی اقتصاد هر پروژه صنعتی دیگر نیز استفاده شود.

**طبقه بندی JEL:**

**کلیدواژه ها: راکتور هسته ای، راکتور کوچک، اقتصاد راکتور، جذب سرمایه، اقتصاد هسته ای**

**1.مقدمه**

توسعه انرژی بخشی جدایی ناپذیر از پیشرفت اقتصادی است. منابع انرژی متعددی وجود دارد که امروزه برای تولید برق استفاده میشود؛ که به طور عمده به سه دسته زیر تقسیم میشوند:

 1-سوخت های فسیلی : عمدتا نفت، گاز ، ذغال سنگ و ...
 2-منابع تجدید پذیر : عمدتا ابی، خورشیدی، باد و ...
 3-انرژی هسته ای

انرژی برای رقابت اقتصادی یک کشور مهم است، زیرا بر هزینه های تولید ، صنایع، خدمات و همچنین قدرت خرید خانوار تاثیر می گذارد. انرژی هسته ای یکی از منابع اصلی تولید برق پایه است. و از جهتی نیز تنها منبعی است که برای تولید انرژی در سطح وسیع مورد استفاده قرار میگیرد که عاری از کربن است. [1]

گرچه اقتصاد راکتورهای کوچک هسته ای هنوز شناخته نشده است و بسیاری از مطالعات انجام شده توسط اژانس بین المللی انرژی اتمی و اژانس انرژی هسته ای در سال های گذشته نیز اقتصاد نامطلوب و یا حداقل نامعلوم را به عنوان نگرانی اصلی برای راکتور های کوچک به حساب اورده اند؛ اما هر دو اژانس با تجدید نظر در سالهای اخیر نگاه تازه و دقیقتری نسبت به اقتصاد پیش بینی شده راکتورهای کوچک در پیش گرفته اند. [2]

در یک گزارش که در سال 2011 توسط اژانس انرژی هسته ای منتشر شد در مورد امکان سنجی اقتصادی راکتورهای کوچک هسته ای اشاره شده است که :" ویژگی های راکتورهای کوچک مدولار مانند سرمایه های کوچک سرمایه گذاری اولیه، زمان ساخت کوتاه، ساخت و ساز در محل، انعطاف پذیری در ترکیب کردن نیروگاه ها و برنامه های کاربردی برای سرمایه گذاران خصوصی جذاب هستند." [3]

راکتورهای کوچک میتوانند جز مهمی از رنسانس جهانی هسته ای باشند. برای رفع نیازهای روزافزون انرژی کشورهای در حال توسعه و بازارهای نوظهور راکتورهای کوچک مورد نیاز است. آژانس بین المللی هسته راکتورهایی با قدرت 300 مگاوات تا حدود 700 مگاوات را راکتور کوچک تعریف میکند. راکتورهای کوچک در حال حاظر در مراحل مختلف توسعه در سراسر دنیا هستند. راکتورهای کوچک دارای ویژگی های جذابی چون سادگی، ایمنی بیشتر و نیاز به منابع مالی محدود هستند. [4]

**2.دیدگاه های بازار:**

از انجاییکه راکتورهای هسته ای به لحاظ تاریخی بیشتر در بخش های بزرگ توسعه یافته اند اولین سوال که به ذهن میرسد این است که چگونه راکتورهای کوچک از لحاظ اقتصادی با راکتورهای بزرگ – بالای 1000 مگاوات – میتوانند رقابت کنند. ابتدا باید دانست هر دونوع راکتورها مخصوص بازارهای خاصی هستند و واقعیت نیز این است که راکتورهای بزرگ برای بسیاری از کشورها و استفاده ها گزینه های مناسبی نیستند. برخی از این شرایط عبارت اند از:

**2-1. شبکه های برق با ظرفیت های محدود**

یک قاعده ی کلی وجود دارد که نباید شبکه را تحت تغییرات و نوسانات بیش از 10 درصد قدرت کل شبکه قرار داد بنابراین نیروگاهی و راکتورهای با ظرفیت بیش از 1000 مگاوات نمیتوانند در شبکه های 10 گیگاواتی – 100 مگاواتی - و یا کمتر مستقر شوند.

**2-2. مناطق دورافتاده**

در تمام نقاط دنیا مناطق دورافتاده ای وجود دارند که هم جمعیت قابل توجه ی دارند و هم از لحاظ امنیتی و اقتصادی امکان کشیدن خطوط برق به انها وجود ندارد. از این رو استفاده از راکتورهای هسته ای کوچک هم میتواند مشکل انرژی این مناطق را حل کند و هم از هزینه انتقال انرژی و سرویس های دوره ای خطوط انتقال را از بین ببرد. و همچنین از لحاظ امنیت و ایمنی مشکلات کمتری را ایجاد کند.

**2-3. جغرافیا و جمعیت شناسی**

مناطق متوسط شهری و مناطق نسبتا پراکنده نیاز به چند مرکز قدرت دارند. و استفاده از یک مرکز قدرت میتواند مشکلاتی را در بر داشته باشد. به عنوان مثال ایجاد مشکل در یک ناحیه میتواند منجر به از کار افتادگی سیستم های برق رسانی تمام مناطق شود.

**2-4. قابلیت های مالی**

سرمایه مورد نیاز راکتورهای کوچک در حد چند صد میلیون دلار است برخلاف راکتورهای بزرگ که نیازمند چند میلیارد دلار میباشند. همین مسئله میتواند به بخش خصوصی فرصت دهد تا در این بخش ها سرمایه گذاری کند. و کشور های کوچک نیز میتوانند با هزینه کمتر نیاز انرژی خود را برطرف کنند.

**2-5. استفاده های دیگر ( نمک زدایی، گرمایش منطقه، بخار صنعتی )**
درحالی که تولید برق مستقل از اندازه راکتورهاست و همگی میتوانند برق تولید کنند. اما به دلایل قابل توجه از راکتورهای بزرگ بیشتر بصورت مستقل برای تولید برق بکار برده میشود و کمتر در دیگر حوزه ها استفاده میشود. [5]

**3.عوامل جذب سرمایه:**

از عوامل جذاب برای جذب سرمایه گذاری در این بخش میتوان به موارد زیر اشاره کرد:

1-هزینه سرمایه اولیه
2-زمان اجرای پروژه
3-ماکزیمم هزینه های نقدی
4-هزینه کل ساخت
5-ریسک پایین سرمایه گذاری

 در رابطه با موارد بالا ابتدا باید اشاره کرد سرمایه اولیه مورد نیاز برای ساخت راکتورهای کوچک پایین میباشد که به همین جهت سرمایه گذاران را بیشتر ترغیب میکنند تا بر روی چنین پروژه هایی سرمایه گذاری کنند و از جهتی تعداد سرمایه گذارانی را که توان مالی چنین کاری را دارند افزایش میدهد؛ از سوی دیگر زمان کوتاه پروژه نیز ریسک سرمایه گذاری های طولانی مدت و خطر تغییرات بازار را از بین میبرد و سود وام های اخذ شده توسط سرمایه گذاران را کاهش میدهد. از سوی دیگر قیمت مناسبتر این نوع از راکتورها میتوانند مشتریان بیشتری را به خود جلب کند. همچنین قابل ذکر است که ماکزیمم هزینه های نقدی که باید در مراحل مختلف طراحی ،تولید و ساخت راکتورهای کوچک هسته ای تهیه شود نسبت به راکتورهای بزرگ بسیار کمتر میباشد.

**4. ویژگیهای اقتصادی روند تولید و ساخت:**

یکی دیگر از جنبه های اقتصادی راکتورهای کوچک توجه به روند ساخت و ویژگی های ذاتی انها میباشد. در کل میتوان راکتورهای کوچک را به دو دسته تقسیم کرد؛ دسته اول در محل ساخته و مونتاژ می شود همانند راکتورهای بزرگ اما دسته بعدی میتواند بطور کامل در یک کارخانه ساخته و مونتاژ شود. این دو شیوه ساخت، تولید و مونتاژ میتواند بر اقتصاد این نوع از راکتورها تاثیر بگذارد به نحوی که:

1-در روشی که راکتورها در کارخانه تولید میشود علاوه بر صرفه جویی در هزینه های اصلی به دلیل تولید انبوه در کارخانه ها صرفه جویی بیشتری در هزینه ها را میتوان مشاهده کرد و نرخ بهره وری را بالا برد که خود باعث کاهش کل هزینه ها میشود. بطور کلی ساخت راکتور در این شرایط بین 30-40 درصد به کاهش هزینه ها کمک میکند.

2-ساده سازی در طراحی : در برخی از راکتورهای کوچک پیشرفته ساده سازی طراحی قابل توجه است که از طریق ترکیب ویژگی های ایمنی ذاتی که برای راکتورهای بزرگ امکان پذیر نیست بدست می اید. اگر چنین ساده سازی در طراحی ممکن باشد میتواند به اقتصاد این نوع از راکتور ها کمک کند؛ بطوری که طبق گفته ها ساده سازی در راکتورهای کوچک اب تحت فشار میتواند به کاهش 15 درصدی هزینه ها کمک کند.

3-طبق امار تولید این نوع راکتور ها در چندین کارخانه میتواند 20 درصد ارزانتر از همان نوع راکتور در محل باشد. اما این درصد به دلیل هزینه های ذاتی یک کارخانه مثل تعمیر و نگهداری میتواند تا 10 درصد کاهش پیدا کند.

4-ساختن چند راکتور در سایت به جای یک راکتور در سایت میتواند بین 10-25 درصد ارزانتر باشد. از جهتی هزینه ساخت راکتورهای دوم، سوم و ... میتواند حدود 15-55 درصد ارزانتر از راکتور اول باشد؛ زیرا در راکتورهای بعدی هزینه های اولیه معمول و زمان ساخت راکتور و زمان مورد نیاز برای هماهنگی واحد ها و هزینه و زمان یادگیری عوامل موثر روند ساخت و تولید کاهش می یابد. با توجه به تمام عوامل بالا ساخت چند راکتور و استفاده در یک سایت نسبت به ساخت یک راکتور مشابه در همان سایت میتواند 10-40 درصد ارزانتر باشد**.** [6]

**5.ویژگی های خاص راکتورهای کوچک:**

راکتورهای کوچک ویژگی هایی دارند که مخصوص انهاست و بر اقتصاد انها تاثیر میگذارد. خلاصه ای از ویژگی های خاص این راکتورها عبارت اند از:

1-ویژگی های مرتبط با طراحی
2-چگالی کم -کوچکی ابعاد راکتور-
3-همگام سازی با دیگر راکتور ها
4-تطبیق کامل با نیاز بازار
5-کاهش هزینه های برنامه ریزی و یادگیری
5-هماهنگی بین تولید و مصرف انرژی
7-ساخت صنعتی قطعات، جدا از هم
8-تولید انبوه و حجم سفارشات بالا

مهمترین ویژگی خاص مربوط به راکتورهای کوچک طراحی انهاست از انجا که راکتورهای کوچک طیف های وسیعی از نیازها را برطرف میکنند طراحی انها با هم میتواند تفاوت داشته باشد اما چند مورد که در اکثریت انها مشاهده میشود به شرح زیر است:

**5-1. ویژگی های مرتبط به طراحی**

سادگی قطعات و نوع و تعداد قطعاتی که کاهش یافته اند از ویژگی های این راکتورهاست. این راکتورها معمولا جدید هستند و در طراحی انها سعی میشود که مشکلات بسیار ساده حل شوند. سادگی قطعات کمک میکند که از تمام ظرفیت ها برای تولید قطعات استفاده شود برخلاف راکتورهای بزرگ که ساخت قطعات ان صرفا در انحصار چند شرکت و کارخانه میباشد.

**5-2. ایمنی**

خصوصیات ایمنی این راکتورها افزایش یافته و ایمنی های منفعل در این راکتورها به دلیل کوچک بودن حجم قطعات و راکتور بهتر و موثرتر عمل میکنند. همین ویژگی باعث بالا رفتن ایمنی و کاهش مسایل مربوط به کسب مجوز میشود. و عملا این صنعت را از بازرسی های پرهزینه و وقت گیر دور میکند.

**5-3. هزینه های نگهداری و اداری پروژه[[1]](#footnote-1)**

به دلیل ایمنی قابل ملاحظه راکتورهای کوچک این راکتورها توانایی کسب مجوز را بدون نیاز به واکنش های اضطراری دارند همین مسئله نیاز اموزش های پرسنلی و الزامات زیربنایی را از بین میبرد. بعضی از این راکتورها مانند راکتورهای تحت فشار اب دوره های تعمیر و نگهداری را تا 4 سال افزایش داده اند. که بطور قابل توجهی باعث کاهش مواجه کاری پرسنل و هزینه های الارا[[2]](#footnote-2) میشود.

**5-4. امنیت**

سیستم های ایمنی مهندسی که برای افزایش ایمنی راکتورهای بزرگ بکار گرفته میشود به دلیل کوچک بودن اندازه راکتور ساده تر و ارزان تر اجرایی میشوند. همچنین سیستم های فعال و منفعل ایمنی در این راکتورها انعطاف و تاثیرگذاری بیشتری نسبت به راکتورهای بزرگ دارند. و با این شرایط شانس کمی برای حوادث داخلی راکتور و هسته ان وجود دارد. به عنوان مثال به دلیل کوچک بودن اندازه کل ساختمان نیروگاه کنترل خطرات طبیعی ساده تر انجام میپذیرد همچنین شانس کمتری در مقابل برخورد هواپیما و موشک و ... در حوادث غیرطبیعی وجود دارد.

**5-5. طول عمر هسته و اجزا نیروگاه**

یکی از دلایل استفاده از راکتورهای کوچک طول عمر زیاد انهاست. این راکتورها طراحی شده اند برای طول عمر بیشتر هسته راکتور و مخزن فشار و همچنین از لحاظ اقتصادی تعویض و نگهداری و تعمیر هسته راکتور و دیگر اجزا ان با هزینه کمتری انجام میپذیرد.

**5-6. دیگر عوامل موثر بر اقتصاد بدون در نظر گرفتن محسوس ویژگی های طراحی و ساخت**

در کنار هزینه تولید انرژی یکی دیگر از شاخص های مهم در یک نیروگاه نرخ مواد اولیه مورد نیاز است مانند میزان فولاد و بتن مورد نیاز راکتورهای کوچک باتوجه به چگالی کم و ابعاد کوچک نرخ متناسبی نسبت به راکتورهای بزرگ دارند و در اکثر موارد این نرخ کمتر از راکتورهای بزرگ است. همچنین به دلیل طراحی کوچک یک خوشه از راکتورهای کوچک در یک نیروگاه فضای کمتری نسبت به یک راکتور بزرگ با همان توان را اشغال میکند.

علاوه بر عوامل بالا یکی از دیگر عواملی که راکتورهای کوچک گزینه های مناسب تری نسبت به راکتورهای یزرگ هستند تولید اب شیرین توسط نمک زدایی تولید بخار برای حرارت مرکزی و یا کاربردهای کشاورزی و یا تولید گرما برای فرایندهای شیمیایی میباشد.

از انجا که نیروگاه های هسته ای با محدودیت های مکانی و جمعیتی مواجه هستند. همواره هزینه های زیربنایی حمل و نقل قابل توجه ای را متحمل میکنند. یکی دیگر از ویژگی های این راکتور این است به دلیل کوچک بودن بسیار نزدیک به بازار خرید و استفاده کننده نهایی ساخته و استفاده شود. و همانطور که قبلا اشاره شده است بهضی از این واحد های هسته ای میتوانند بدون اخذ بعضی از مجوزها شروع بکار کنند. و یکی از اهداف پروژه ایریس[[3]](#footnote-3) نیز کسب مجوز برای یک منطقه بسیار نزدیک به محدوده ی جمعیتی است. و همین ویژگی باعث میشود این راکتورها نسبت به راکتورهای بزرگ در فاصله بسیار نزدیک تری نسبت به جمعیت فعالیت کنند. همچنین، قرار دادن واحدهای کوچکتر، چالش ثبات شبکه و نوسانات شبکه را کاهش می دهد. البته قابل ذکر است در شبکه های بزرگ تفکیک واحد های انرژی ممکن است مشکل ساز باشد به همین دلیل در شبکه های بزرگ برق و یا همگام سازی خوشه های راکتور و یا چند نیروگاه باید با احتیاط رفتار کرد. همچنین لازم ذکر است قطعات کوچک این دسته از راکتورها میتوانند بصورت صنعتی در یک کارخانه تولید و یا مونتاژ شوند.

یک مثال در شکل 1 نشان داده شده است؛ چهار ماژول 335 مگاوات در هر سال (ساخت سه ساله) با یک کارخانه 1340 مگاوات (ساخت 5 ساله) مقایسه می شودو مقایسه بین تامین مالی 10 درصد در طی یک دوره 10 ساله برای هر دو صورت گرفته است. [7]

شکل 1- نمودار جریان مالی برای ساخت و عملیات 4 راکتور کوچک در مقابل یک راکتور بزرگ[8] برحسب سال (مبالغ به میلیون دلار هستند )

با بررسی شش عامل مهم در اقتصاد راکتورهای کوچک که عبارت اند از :

اندازه، چند واحد راکتور در یک سایت واحد، یادگیری پرسنل،زمان ساخت، عرضه و تقاضا و ویژگی های مربوط به طراحی میتوان نتایج زیر راگرفت:

اولین نتیجه بدست امده میزان صرفه جویی در هزینه ها از طریق افزایش سطح تولید میباشد.[[4]](#footnote-4) با توجه به فرمول زیر که نشان دهنده هزینه تولید یک کیلووات انرژی است در می یابیم که هزینه تولید انرژی در راکتورهای کوچک مثل پروژه ایریس حدود 70 درصد بیشتر از یک راکتور یزرگ است. مقایسه بین یک یا دو واحد 335 مگاواتی و یک واحد 1340 مگاواتی انجام گرفته است.[[5]](#footnote-5)



بر اساس این اصل، هزینه یک راکتور کوچک بطور کلی بالاتر از یک راکتور بزرگ میباشد. البته باید توجه کرد این اصل محدودیت هایی دارد از جمله اینکه طراحی راکتورهای کوچک و بزرگ مشابه باشد. در حال حاضر راکتورهای کوچک هسته ای طرح های بسیار متنوعی نسبت به رآکتورهای بزرگ هسته ای دارند و از این رو فرض بر این است که هزینه یک رآکتور هسته ای کوچک، بالاتر از یک رآکتور بزرگ است؛ فرض اشتباهی است. هزینه یک شبه[[6]](#footnote-6) و هزینه انرژی بالقوه[[7]](#footnote-7) شاخص های کلیدی هستند که معمولا برای تعیین اقتصاد پروژه های هسته ای و بطور کلی پروژه های منتهی به تولید برق استفاده میشوند. در فاکتور هزینه یک شبه فرض بر این است کل پروژه یک شبه انجام میپذیرد. و توجهی به زمان ساخت و ساز ان نمیشود. اما شاخص هزینه انرژی بالقوه، نسبت هزینه های طول عمر، بر برق تولید شده در طول عمر میباشد. با توجه به تعریف هزینه انرژی بالقوه باید اشاره کرد هزینه های کل پروژه به عواملی چون کل سرمایه گذاری، هزینه های مربوط به عملیات و نگهداری چون قابلیت اطمینان و ایمنی، هزینه سوخت به عنوان مثال تولید و غنی سازی سوخت، پردازش مجدد سوخت مصرف شده و دفع زباله، هزینه های حذف که به معنی هزینه های عملیات اداری و فنی است که به منظور حذف برخی از یا تمام کنترل های قانونی از یک تاسیسات هسته ای میباشد. هزینه های ذکر شده عمدتا در راکتورهای کوچک هسته ای کمتر و مقرون به صرفه تر هستند.

**6- جمع بندی و نتيجه‌گيري**

مطالعات مختلفی برای ارزیابی رقابت راکتورهای های کوچک انجام شده است و نتایج بدست امده به اقتصاد رقابتی راکتورهای کوچک در مقایسه با راکتورهای بزرگ اشاره دارند. سایر مطالعات نشان میدهند که تامین نیاز مالی راکتورهای کوچک نسبت به راکتورهای بزرگ مقرون به صرفه نیست و برای مناطقی مناسب است که امکان استفاده از راکتورهای بزرگ نیست. البته لازم به ذکر است که چند راکتور کوچک میتوانند توان یک راکتور بزرگ را داشته باشند. و از لحاظ خروجی کل با راکتورهای بزرگ برابری کنند. [9]

همچنین با در نظر گرفتن دیگر فاکتورهای اقتصادی ذکر شده هزینه مورد نیاز برای تولید انرژی در راکتورهای کوچک همانند ایریس[[8]](#footnote-8) کاهش پیدا میکند. به عنوان مثال در پروژه هایی که چند راکتور کوچک در کنار هم ساخته میشوند. همانطور که قبلا ذکرشده است هزینه ها در ساخت وساز واحد های دوم و سوم و ... بین 15 تا 55 درصد کاهش پیدا میکند.همچنین کاهش هزینه ها از طریق تولید انبوه در کارخانه همراه با تولید تعداد زیادی از راکتورهای استاندارد یا ماژول های تجهیزات که یکپارچه شده اند نیز از لحاظ اقتصادی راکتورهای کوچک را رقابتی تر میکنند. از موارد قابل توجه دیگر میتوان به از بین بردن سوخت گیری در محل اشاره کرد[[9]](#footnote-9) سوخت گیری در این راکتورها نیازمند تجهیزات سوخت رسانی و ظرفیت ذخیره سازی برای سوخت تازه یا مصرف شده چندانی ندارد. و همچنین راکتورهای کوچک توانایی استفاده از فناوری هایی را دارند که کاملا غیر هسته ای هستند.[[10]](#footnote-10) و این خود باعث کاهش مجوزها و سطح امنیتی پروژه میشود. که از این بابت بسیار از راکتورهای بزرگ اقتصادی تر و موثر تر هستند. [10] همچنین با بررسی های انجام شده در بعضی از پروژه ها 14 درصد صرفه جویی در کل هزینه ها برای یک واحد با 4 راکتور تخمین زده شده است. و همچنین هزینه های یادگیری نیز بین 8 تا 10 درصد کاهش پیدا میکند. دو فاکتور اقتصادی بعدی یعنی ساخت و ساز و زمان عرضه به بازار یا همان زمان بندی نیز با توجه به مدت زمان ساخت راکتورهای کوچک که عموما 3 سال است نسبت به راکتورهای بزرگ که حدود 5 سال زمان میبرند چیزی حدود 6 درصد برای کوتاهی در زمان ساخت و ساز صرفه جویی میشود. همچنین راکتورهای کوچک در اکثر موارد بهتر از راکتورهای بزرگ به تقاضای بازار جواب میدهند. [12]

ویژگی های اصلی طراحی مربوط به ایریس عبارتند از: حذف فشار ساز، مخازن تحت فشار تولید کننده بخار، محفظه پمپ های کنسرو شده، لوله های بزرگ اولیه، از بین بردن چندین سیستم ایمنی مانند سیستم خنک کننده هسته اورژانسی تزریق فشار با توجه به روش ایمنی طراحی شده که از وقوع چند حادثه پیش بینی شده جلوگیری میکند؛ قرار گیری فشرده اجزا و مقدار کم متریال مورد استفاده باعث میشود[13] [14] که 17 درصد در هزینه های پایه ای تولید صرفه جویی به عمل اید. با توجه به کاهش هزینه در راکتورهای کوچک در موارد بالا و بالا بودن هزینه تولید یک کیلووات ساعت میتوان نتیجه گرفت که هزینه ساخت راکتورهای کوچک تقریبا معادل راکتورهای بزرگ است اما با در نظر گرفتن تمام عوامل و بویژه عوامل موثر در ساخت ( ساخت در محل ، ساخت در کارخانه ، تولید صنعتی بیشتر اجزای کوچک در کارخانه ) و عوامل اقتصادی دیگر که قبلا ذکر شده است. راکتورهای کوچک میتوانند کم هزینه تر از راکتورهای بزرگ باشند و سود دهی بیشتری داشته باشند. اما باید به تقاضای بازار و شرایط برای تصمیم گیری توجه کرد. [15]

شش عامل مورد بررسی قرار گرفت: اندازه، واحدهای چندگانه در یک سایت واحد، یادگیری، زمان ساخت ،عرضه و تقاضا و ویژگی های مربوط به طراحی نتایج بدست امده در شکل-2 و جدول-1 مقایسه شده اند:

شکل 2- پتانسیل رقابت اقتصادی رآکتورهای کوچک[16]

جدول 1-کَمی کردن عوامل مورد بررسی شکل-2 در راکتورهای کوچک و بزرگ[[11]](#footnote-11) [17]

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Cumulative****LARGE/SMR** | **Individual****SMR/LARGE** | **Factor** | **شماره** |
| **7/1** | **7/1** | **Economy of scale** | **1** |
| **46/1** | **86/0** | **Multiple units** | **2** |
| **34/1** | **92/0** | **Learning** | **3** |
| **26/1** | **94/0** | **Construction schedule and timing** | **4-5** |
| **05/1** | **83/0** | **Design specific** | **6** |

**8- منابع**

[1] Jorge Morales Pedraza. (2017). Small Modular Reactors for Electricity Generation an Economic and Technologically Sound Alternative. Springer International Publishing

[2] Daniel T Ingersoll. (2015). Small Modular Reactors Nuclear Power Fad or Future. Woodhead Publishing

[3] Daniel T Ingersoll. (2015). Small Modular Reactors Nuclear Power Fad or Future. Woodhead Publishing

[4] M. D. Carelli, B. Petrovic, C. W. Mycoff P. Trucco, M. E. Ricotti, G. Locatelli. (2007). Economic Comparison of Different Size Nuclear Reactors, Proceedings IJM Cancun.

[5] M. D. Carelli, B. Petrovic, C. W. Mycoff P. Trucco, M. E. Ricotti, G. Locatelli. (2007). Economic Comparison of Different Size Nuclear Reactors, Proceedings IJM Cancun.

[6] Kuznetsov V. (2011). Current Status, Technical Feasibility and Economics of Small Nuclear Reactors. nuclear energy agency (OECD).

[7] M. D. Carelli, B. Petrovic, C. W. Mycoff P. Trucco, M. E. Ricotti, G. Locatelli. (2007). Economic Comparison of Different Size Nuclear Reactors, Proceedings IJM Cancun.

[8] M. D. Carelli, B. Petrovic, C. W. Mycoff P. Trucco, M. E. Ricotti, G. Locatelli. (2007). Economic Comparison of Different Size Nuclear Reactors, Proceedings IJM Cancun.

[9] Jorge Morales Pedraza. (2017). Small Modular Reactors for Electricity Generation an Economic and Technologically Sound Alternative. Springer International Publishing

[10] Jorge Morales Pedraza. (2017). Small Modular Reactors for Electricity Generation an Economic and Technologically Sound Alternative. Springer International Publishing

[11] Kuznetsov V. (2011). Current Status, Technical Feasibility and Economics of Small Nuclear Reactors. nuclear energy agency (OECD).

[12] M. D. Carelli, B. Petrovic, C. W. Mycoff P. Trucco, M. E. Ricotti, G. Locatelli. (2007). Economic Comparison of Different Size Nuclear Reactors, Proceedings IJM Cancun.

[13] International Atomic Energy Agency. (2005). Innovative Small and Medium Sized Reactors: Design Features, Safety Approaches and R&D Trends, IAEA-TECDOC-1451, IAEA, Vienna.

[14] Igor L. Pioro. Handbook of Generation IV Nuclear Reactors. Woodhead Publishing Series in Energy: Number 103.

[15] M. D. Carelli, B. Petrovic, C. W. Mycoff P. Trucco, M. E. Ricotti, G. Locatelli. (2007). Economic Comparison of Different Size Nuclear Reactors, Proceedings IJM Cancun.

[16] M. D. Carelli, B. Petrovic, C. W. Mycoff P. Trucco, M. E. Ricotti, G. Locatelli. (2007). Economic Comparison of Different Size Nuclear Reactors, Proceedings IJM Cancun.

[17] M. D. Carelli, B. Petrovic, C. W. Mycoff P. Trucco, M. E. Ricotti, G. Locatelli. (2007). Economic Comparison of Different Size Nuclear Reactors, Proceedings IJM Cancun.

1. **Specific O&M costs** [↑](#footnote-ref-1)
2. **ALARA: “As Low as Reasonably Achievable”** [↑](#footnote-ref-2)
3. **IRIS: International Reactor Innovative and Secure** [↑](#footnote-ref-3)
4. **economy of scale** [↑](#footnote-ref-4)
5. was adopted with n = 0.62. [↑](#footnote-ref-5)
6. **The overnight capital cost (OCC)** [↑](#footnote-ref-6)
7. **the levelised cost of energy (LCOE)** [↑](#footnote-ref-7)
8. **با توجه به اشنا بودن پروژه آیریس و در دسترس بودن فاکتورها و اطلاعات اقتصادی این پروژه مورد بررسی قرار گرفته است. اما با توجه به عوامل اقتصادی و فنی مهم این پروژه نتایج بدست امده از این بررسی میتواند در مورد دیگر پروژه ها نیز تا حد مناسبی برقرار باشد.** [↑](#footnote-ref-8)
9. **NEA 2011** [↑](#footnote-ref-9)
10. **OECD 2011** [↑](#footnote-ref-10)
11. **یک راکتور کوچک 335 مگاواتی به عنوان بخشی از یک واحد 4 راکتوری در مقابل یک راکتور 1340 مگاواتی** [↑](#footnote-ref-11)