

# رقابت پذیری اقتصادی نیروگاه‌های هسته‌ای در ایران

عباس ترابی اردکانی<sup>۱</sup> محمد باقر غفرانی<sup>۲</sup>

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی انرژی- دانشگاه صنعتی شریف- تهران- ایران

[ab-torabi@energy.sharif.edu](mailto:ab-torabi@energy.sharif.edu)

۲- دانشیار دانشکده مهندسی انرژی - دانشگاه صنعتی شریف تهران- ایران

[ghofrani@sharif.edu](mailto:ghofrani@sharif.edu)

**چکیده:** در این مقاله رقابت‌پذیری اقتصادی نیروگاه‌های هسته‌ای در ایران، در مقایسه با نیروگاه‌های فسیلی مورد تحلیل قرار گرفته است. بدین منظور ابتدا عوامل تاثیرگذار در مقایسه اقتصادی نیروگاه‌های حرارتی همچون هزینه سرمایه‌گذاری، هزینه تعمیر و نگهداری، هزینه سوخت، نرخ تنزیل و مالیات آلاینده‌ها شناسایی شده و سپس با استفاده از روش تحلیل غربالی تاثیر هر یک از پارامترها به دقت مورد بررسی قرار گرفته است. در این روش، نقاط سر به سر قیمت گاز، به عنوان تاثیرگذارترین پارامتر در هزینه تمام شده نیروگاه‌های فسیلی و هزینه سرمایه‌گذاری ویژه، به عنوان تاثیرگذارترین پارامتر در هزینه تمام شده نیروگاه‌های هسته‌ای، در ضریب ظرفیت ثابت ۸/۰ (که مبنای اکثر گزارشات معتبر بین المللی است) محاسبه شده است. نتایج بررسی نشان می‌دهد که در خوشبینانه‌ترین حالت یعنی هزینه سرمایه‌گذاری ۱۵۰۰ دلار به ازای هر کیلووات ظرفیت نصب شده نیروگاه‌های هسته‌ای، این نیروگاه‌ها به ازای حداقل قیمت گاز ۷ سنت به ازای هر متر مکعب با نیروگاه‌های فسیلی رقابت‌پذیر خواهند بود و با افزایش هزینه سرمایه‌گذاری به ۲۵۰۰ دلار، این حداقل قیمت به ۱۷ سنت افزایش می‌یابد. با توجه به اینکه قیمت تمام شده گاز ایران در شرایط فعلی بین ۳ تا ۴/۵ سنت به ازای هر متر مکعب است و هزینه فرصت آن با توجه به ناچیز بودن پتانسیل صادرات نسبت به ذخایر موجود نزدیک به صفر است، رقابت‌پذیری اقتصادی نیروگاه‌های هسته‌ای در شرایط فعلی جای بحث دارد. افزایش هر چه بیشتر هزینه فرصت گاز موجب افزایش قابل توجه رقابت‌پذیری نیروگاه‌های هسته‌ای در کشور خواهد شد. لازم به ذکر است که نتایج بدست آمده بر اساس مفروضات اقتصادی ۲۰۰۵-۲۰۰۷ است که به صورت سالانه قابل روز آمد شدن است.

**کلمات کلیدی:** نیروگاه‌های هسته‌ای، رقابت‌پذیری اقتصادی، هزینه سرمایه‌گذاری نیروگاه‌های هسته‌ای، هزینه فرصت

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۸۷/۰۴/۱۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۸۸/۱۱/۰۴

نام نویسنده‌ی مسئول: عباس ترابی اردکانی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - تهران - خیابان آزادی - دانشگاه صنعتی شریف - دانشکده‌ی مهندسی انرژی

## ۱- مقدمه

احداث نیروگاه‌های مختلف است. این هزینه در مراجع بین‌المللی معمولاً به دو صورت زیر گزارش می‌شود:

**هزینه سرمایه‌گذاری یک‌شبه<sup>۱</sup>** بیانگر قیمت نیروگاه با فرض اتفاق افتادن همزمان همه هزینه‌ها در یک زمان (بدون در نظر گرفتن بهره‌های دوران ساخت) است.

**قیمت واقعی نیروگاه نصب شده در سال شروع بهره‌برداری:** که با در نظر گرفتن بهره‌های دوران ساخت<sup>۲</sup> و اعمال یک نرخ بهره (معمولاً برابر نرخ تنزیل مورد استفاده، در هم‌تراز کردن هزینه‌های تولید) روی هزینه یک‌شبه، بدست می‌آید.

## ۲-۲- هزینه هم‌تراز شده<sup>۳</sup> تولید انرژی الکتریکی

این هزینه برحسب \$/MWh یا €/MWh نشان داده می‌شود و معیار متداول بین‌المللی برای مقایسه مشخصه‌های اقتصادی نیروگاه‌های تولید برق است. این هزینه معمولاً به سه مولفه زیر تفکیک می‌شود:

هزینه سرمایه‌گذاری (سهام هزینه سرمایه‌گذاری در قیمت انرژی الکتریکی تولیدی)، هزینه سوخت (سهام هزینه سوخت در قیمت انرژی الکتریکی تولیدی)، هزینه تعمیرات و نگهداری (سهام هزینه تعمیرات و نگهداری در قیمت انرژی الکتریکی تولیدی)

هزینه هم‌تراز شده تولید انرژی الکتریکی از رابطه (۱) بدست می‌آید:

$$EGC = \frac{\sum [I_t + M_t + F_t](1+r)^{-t}}{\sum [E_t(1+r)^{-t}]} \quad (1)$$

که در آن:

EGC: هزینه تولید هم‌تراز شده  $F_t$ : هزینه سوخت در سال  $t$

$I_t$ : هزینه سرمایه‌گذاری در سال  $t$ ،  $E_t$ : تولید الکتریسته در سال  $t$

$M_t$ : هزینه تعمیر و نگهداری در سال  $t$ ،  $r$ : نرخ تنزیل

اگرچه معیار اول (هزینه سرمایه‌گذاری ویژه) در محاسبه معیار دوم (هزینه هم‌تراز شده تولید) لحاظ شده است ولی، به دلیل بالا بودن هزینه سرمایه‌گذاری مورد نیاز برای احداث نیروگاه‌های هسته‌ای، در مقایسه با نیروگاه‌های فسیلی، معیار اول بویژه در شرایط کمبود سرمایه و منابع مالی، مستقلاً نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱].

## ۳- مولفه‌های مهم رقابت‌پذیری اقتصادی

### نیروگاه‌های هسته‌ای

#### ۳-۱- هزینه سرمایه‌گذاری

نیروگاه‌های هسته‌ای دارای هزینه سرمایه‌گذاری زیاد و هزینه‌های نهایی<sup>۴</sup> کم هستند. نکته قابل توجه این است که بر خلاف نیروگاه‌های دیگر، تفاوت زیادی در اعلام هزینه ساخت این نیروگاه‌ها از سوی مراجع مختلف وجود دارد که در اینجا به برخی عوامل تاثیرگذار در متفاوت بودن هزینه سرمایه‌گذاری و گسترده بودن محدوده فرضیات اشاره می‌شود.

- متفاوت بودن تکنولوژی راکتورهای نیروگاه‌های هسته‌ای

پیش‌بینی‌های مراجع بین‌المللی نشان می‌دهد، با توجه به رشد سریع مصرف انرژی الکتریکی در دهه‌های آتی، استفاده از انرژی هسته‌ای پس از طی دوران رکود دو دهه اخیر، روند رو به رشدی را پیش رو خواهد داشت [۱]. با وجود بالاتر بودن هزینه سرمایه‌گذاری نیروگاه‌های هسته‌ای نسبت به نیروگاه‌های فسیلی، آنچه امروزه استفاده از این نیروگاه‌ها را برای برخی کشورها رقابت‌پذیر کرده است، عمدتاً محدودیت‌های زیست‌محیطی نیروگاه‌های فسیلی از نظر رهاسازی گازهای گلخانه‌ای و پایین‌تر بودن هزینه سوخت هسته‌ای (نسبت به سوخت فسیلی وارداتی) است. همچنین، فناوری پیشرفته نیروگاه‌های هسته‌ای، می‌تواند منافع جنبی توسعه و ارتقای سایر صنایع را نیز در برداشته باشد. با این وجود تصمیم‌گیری در مورد استفاده از انرژی هسته‌ای، همواره چالش برانگیز و تابع شرایط و معیارهای فنی اقتصادی، امنیتی، اجتماعی و سیاسی خاص هر کشور است.

با توجه به اینکه در کشور ما، برنامه وسیعی جهت استفاده از انرژی هسته‌ای اعلام شده است، بررسی مزایا و معایب استفاده از این انرژی از جنبه‌های مختلف بسیار اهمیت دارد. در این مقاله با توجه به آخرین اطلاعات فنی - اقتصادی موجود نیروگاه‌های کشور و آخرین گزارشات معتبر بین‌المللی (تا سال ۲۰۰۷) رقابت‌پذیری اقتصادی نیروگاه‌های هسته‌ای با نیروگاه‌های فسیلی در تامین بار پایه، بررسی شده است. بدین منظور ابتدا معیارها و روش‌های ارزیابی اقتصادی انواع نیروگاه‌های تولید برق بیان شده و ضمن معرفی مولفه‌های مهم رقابت‌پذیری نیروگاه‌های هسته‌ای، رقابت‌پذیری اقتصادی این نیروگاه‌ها مورد مطالعه قرار گرفته است. ضمناً مطالعات حساسیت، روی پارامترهای تاثیرگذار بر رقابت‌پذیری نیروگاه‌های هسته‌ای انجام شده است.

لازم به ذکر است که این مقاله نتایج بخش اول یک پروژه تحقیقاتی در زمینه ارزیابی ظرفیت بهینه نیروگاه‌های هسته‌ای در افق ۲۰ ساله ۱۳۸۶ - ۱۴۰۵ با استفاده از نرم‌افزار WASP IV است که در آن سناریوهای مناسب، جهت محاسبه ظرفیت بهینه نیروگاه‌های هسته‌ای با استفاده از این نرم افزار، بدست آمده است.

## ۲- معیارهای ارزیابی اقتصادی نیروگاه‌های تولید

### برق

معیارها و روش‌های ارزیابی اقتصادی انواع نیروگاه‌های تولید برق از جمله نیروگاه‌های هسته‌ای از دیرباز شناخته شده و استاندارد شده است. رقابت‌پذیری نیروگاه‌های هسته‌ای معمولاً با دو معیار زیر مورد ارزیابی قرار می‌گیرد [۱].

#### ۲-۱- هزینه سرمایه‌گذاری ویژه

این هزینه بر مبنای قیمت واحد ظرفیت الکتریکی نصب شده (بر حسب \$/KWe یا €/KWe) بیان می‌شود و کاربرد آن علاوه بر محاسبه هزینه تولید، برای ارزیابی میزان سرمایه‌گذاری مورد نیاز برای

- متفاوت بودن زمان ساخت نیروگاه‌ها در کشورهای مختلف که تاثیر زیادی بر بهره‌دوران ساخت می‌گذارد. در کشورهای پیشرفته این دوره را معمولاً بین ۵ تا ۷ سال در نظر می‌گیرند؛ البته در کشورهای درحال توسعه نظیر ایران این دوره طولانی‌تر است [7].
- سری‌سازی و افزایش توان ساخت داخل که موجب کاهش هزینه‌های احداث این نیروگاه‌ها در برخی کشورها می‌شود.
- در نظر گرفتن نرخ تنزیل متفاوت، این نرخ، در کشورهایی که با کمبود سرمایه روبرو هستند حدود ۱۰ درصد است اما در کشورهای با سرمایه زیاد، به ۵ درصد هم می‌رسد.
- در کشورهای سازنده نیروگاه‌های هسته‌ای حدود ۸۰ درصد هزینه‌های احداث نیروگاه مربوط به هزینه‌های مهندسی، تجهیزات و ساخت است (EPC). از طرفی بیش از ۶۰ درصد فعالیت‌های مهندسی در محل سایت انجام می‌گیرد و هزینه ساخت تجهیزات بزرگی مانند توربین ژنراتورها، مولد بخار که در کارخانه و خارج از سایت ساخته می‌شود. بخش کوچکی از هزینه‌های EPC را تکمیل می‌دهد [6]. لذا در چنین پروژه‌هایی که نیازمند انجام عملیات‌های گسترده مهندسی در سایت می‌باشد، کنترل هزینه‌ها تا حدود زیادی دشوار است.

### ۲-۳- هزینه سوخت

هزینه سوخت برای نیروگاه‌های هسته‌ای جدید با در نظر گرفتن هزینه پسمانداری حدوداً ۲۰ درصد هزینه هم‌تراز شده تولید برق این نیروگاه‌ها است در حالی است که در مورد نیروگاه‌های سیکل ترکیبی، این رقم در کشورهای وارد کننده گاز و سایر سوخت‌های فسیلی حدود ۷۵ درصد است [5]. از طرفی در طراحی‌های جدید حد فرسایش سوخت (burn up) راکتورهای هسته‌ای افزایش یافته که منجر به اقتصادی‌تر شدن هزینه آن می‌شود. پایین بودن هزینه سوخت اصلی-ترین مزیت این نیروگاه‌ها در رقابت با سایر نیروگاه‌ها است.

### ۳-۳- هزینه آلاینده‌ها

از زمانی که نیروگاه‌های فسیلی ملزم به پرداخت مالیات کربن و برخی آلاینده‌ها شده‌اند رقابت‌پذیری نیروگاه‌های هسته‌ای به دلیل عدم تولید آلاینده‌هایی همچون دی‌اکسید کربن افزایش چشم‌گیری پیدا کرده است. در این مقاله نیز با توجه به مالیات‌های وضع شده در معاهده‌های بین‌المللی و بر اساس مقادیر اعلام شده در مرجع شماره ۷، هزینه آلاینده‌ها محاسبه و به هزینه متغیر نیروگاه‌های فسیلی اضافه شده است.

### ۴- روش‌شناسی بررسی رقابت‌پذیری نیروگاه‌های

#### تولید برق در ایران

در این بخش به طور مختصر روش شناسی بکار رفته در بررسی رقابت‌پذیری نیروگاه‌های هسته‌ای با سایر نیروگاه‌ها تشریح می‌شود.

#### ۴-۱- روش منحنی غربالی

روش غربالی، یک نمایش ساده از هزینه تولید نیروگاه‌های مختلف برق با توجه به ضریب ظرفیت آنها ارائه می‌دهد و بدین ترتیب می‌توان یک

تقریب از ترکیب بهینه تکنولوژی‌های مختلف تولید برق را بدست آورد. مبنای این مقایسه بدین صورت است که در یک دستگاه مختصات، هزینه کل هر تکنولوژی (برحسب کیلووات-سال) در ضرایب ظرفیت مختلف رسم می‌شود. با رسم منحنی‌های مربوط به تکنولوژی‌های مختلف بر روی یک نمودار و یافتن نقاط تقاطع، اقتصادی‌ترین رژیم کاری نیروگاه بدست می‌آید (شکل ۸). بعنوان مثال در ضرایب بار پایین، سرمایه‌گذاری اولیه کم و هزینه زیاد سوخت مربوط به نیروگاه‌های سیکل ترکیبی، ارجحیت بیشتری بر هزینه سرمایه‌گذاری زیاد و هزینه سوخت کم نیروگاه‌های هسته‌ای دارد و بالعکس. با توجه به متفاوت بودن هزینه کل هر تکنولوژی در ضریب ظرفیت‌های مختلف، در این مقاله هزینه تمام شده در ضریب ظرفیت ۰/۸، بعنوان هزینه تمام شده هر تکنولوژی در نظر گرفته شده و مبنای مقایسه قرار گرفته است.

از مزیت‌های این روش می‌توان به دو مورد زیر اشاره کرد:

- نیاز به حداقل داده‌های تکنیکی و تحلیلی به عنوان ورودی
- ارائه سریع‌ترین و ساده‌ترین تخمین در مورد ترکیب بکارگیری تکنولوژی‌های مختلف.

### ۴-۲- نحوه محاسبه هزینه کل سالانه

هزینه کل سالانه از دو مولفه هزینه ثابت (هزینه سرمایه‌گذاری و بخش ثابت هزینه تعمیر و نگهداری) و هزینه متغیر (هزینه سوخت، بخش متغیر هزینه تعمیرات و نگهداری و هزینه آلاینده‌ها) تشکیل و به صورت زیر بر حسب (\$/MW-year) محاسبه می‌شود:

$$(۲) \quad \text{هزینه متغیر سالانه} * \text{ضریب ظرفیت} + \text{هزینه ثابت} = \text{هزینه کل}$$

لازم به ذکر است که هزینه تعمیر و نگهداری شامل دو بخش ثابت و متغیر می‌باشد که بخش ثابت آن معمولاً هزینه‌های پرسنلی و بخش متغیر شامل تجهیزات و لوازم یدکی می‌باشد. با توجه به ارتباط میان میزان تولید آلاینده‌ها و فعالیت نیروگاه این هزینه‌ها نیز جزء هزینه‌های متغیر به حساب می‌آیند.

### ۴-۲-۱- روش محاسبه هزینه سرمایه‌گذاری

هزینه سرمایه‌گذاری نیروگاه‌ها شامل دو بخش می‌باشد که یکی هزینه سرمایه‌گذاری یک‌شبه و دیگری بهره‌دوران ساخت است. هزینه سرمایه‌گذاری یک‌شبه معمولاً بر اساس اعلام مراجع رسمی مختلف برای محاسبات در نظر گرفته می‌شود.

**بهره‌های دوران ساخت:** بهره‌های دوران ساخت (IDC) با در نظر گرفتن یک مدل توزیع زمانی هزینه‌ها در دوران ساخت و اعمال یک نرخ بهره (معمولاً برابر نرخ تنزیل) محاسبه می‌شود. شکل (۱) نمونه‌ای از منحنی تجمعی هزینه بر حسب زمان را نشان می‌دهد که به منحنی S معروف گردیده است و به عنوان مبنای محاسبه ضریب بهره دوران ساخت مورد استفاده قرار گرفته است. با توجه به منحنی شکل (۱) ضرایب مربوطه محاسبه و در رابطه ۳ جهت بدست آوردن بهره دوران ساخت قراردادده می‌شود.

در این قسمت داده‌ها و اطلاعات استفاده شده جهت ارزیابی اقتصادی نیروگاه‌ها به دو بخش عمومی و فنی-اقتصادی تقسیم شده است.

### ۵-۱- اطلاعات عمومی، فنی و اقتصادی نیروگاه‌ها:

مبنای داده‌ها، اطلاعات فنی اقتصادی نیروگاه‌های کشور، تهیه شده توسط دفتر برنامه‌ریزی تولید شرکت توانیر می‌باشد که در آذرماه ۱۳۸۵ منتشر شده است و سال پایه قیمت‌ها انتهای سال ۱۳۸۴ می‌باشد. نرخ‌های تنزیل در نظر گرفته شده بدون لحاظ اثر تورم است.

جدول (۱): داده‌های عمومی برای انجام محاسبات

شرح		کمیت
نرخ تنزیل سالیانه		۵٪ و ۱۰٪
نرخ تبدیل ارز	دلار به ریال	۹۲۵۰
	یورو به ریال	۱۲۵۰۰

جدول (۲)، اطلاعات فنی اقتصادی نیروگاه‌های کشور را نشان می‌دهد. عمر نیروگاه‌ها بر اساس گزارش سال ۲۰۰۵ OECD انتخاب شده و ضریب ظرفیت نیز بر مبنای گزارشات معتبر بین المللی ۸۰ درصد در نظر گرفته شده است.

### ۵-۲- نحوه انتخاب قیمت گاز

رویکردهای مختلفی را می‌توان برای تعیین قیمت گاز در نظر گرفت.

- قیمت اعلام شده از سوی مراجع ذیربط
- هزینه تمام شده گاز برای ایران
- هزینه فرصت گاز

#### قیمت اعلام شده از سوی مراجع ذیربط

بنا بر اعلام سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور (سابق)، قیمت گاز طبیعی برای مصارف نیروگاهی در سال ۱۳۸۴، ۳۰ ریال به ازای هر متر مکعب است [۴]. اما با توجه به در نظر گرفتن قیمت‌ها بر اساس اقتصاد ملی این قیمت یارانه‌ای قابل استناد نمی‌باشد.

#### هزینه تمام شده گاز برای ایران

هزینه تمام شده گاز طبیعی ایران در محل عسلویه، برابر با یک تا یک و نیم سنت است. هزینه انتقال یک متر مکعب گاز طبیعی به ازای هر ۱۰۰۰ کیلومتر حدوداً ۲ سنت است و با احتساب آنکه مرکز ثقل بار گاز طبیعی کشور با عسلویه ۱۵۰۰ کیلومتر فاصله داشته باشد هزینه تمام شده گاز طبیعی در مرکز ثقل مصرف انرژی ۳ الی ۴/۵ سنت به ازای هر متر مکعب خواهد شد [۴]. از طرفی بر اساس اعلام وزارت نفت به شرکت توانیر، قیمت منطقه‌ای گاز تصفیه شده برای محاسبات اقتصادی ۴۲۰ ریال برای سال ۸۴ تعیین شده که معادل ۴/۵ سنت است. همچنین، قیمت گاز وارداتی ایران از ترکمنستان در سال ۸۶، ۸ سنت اعلام شده است؛ اما به دلیل پایین بودن میزان واردات و برابری نسبی میزان واردات از ترکمنستان و صادرات به ترکیه، این قیمت را نمی‌توان مبنای قیمت تمام شده گاز برای ایران به حساب آورد.

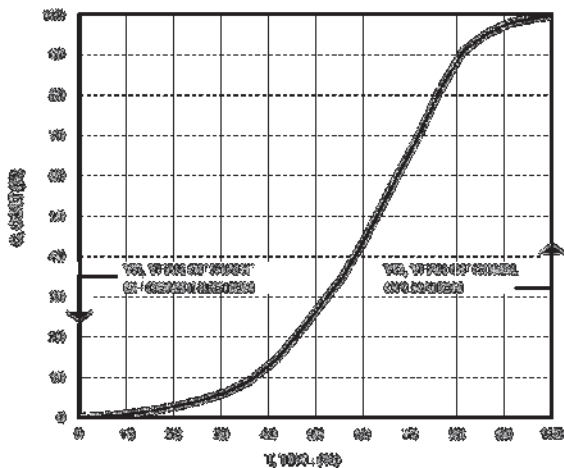
$$IDC = [a_1(1+i)^{(CT-0.5)} + a_2(1+i)^{(CT-1.5)} + a_3(1+i)^{(CT-2.5)} + \dots + a_n(1+i)^{0.5}] \quad (3)$$

CT: مدت زمان ساخت (سال)؛ i: نرخ بهره  $a_i$ : ضرایب منحنی S  
لذا هزینه سرمایه‌گذاری از رابطه ۴ بدست می‌آید:

$$AIC = \text{Overnight Cost} * IDC * (A/P, i, n) \quad (4)$$

$$(A/P, i, n) = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad \text{که در آن:}$$

AIC: هزینه سالانه سرمایه‌گذاری است. لازم به ذکر است که هزینه‌ها می‌تواند شامل دو بخش ارزی و ریالی باشد که به صورت جداگانه محاسبه می‌شود.



شکل (۱): نحوه پرداخت هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه نیروگاه بر حسب زمان (منحنی S جهت محاسبه IDC) [۲].

### ۴-۲-۲- روش محاسبه هزینه سوخت

هزینه سوخت مصرفی (\$/MWh) به صورت زیر محاسبه شده است:  
(۵) نرخ حرارتی در بار کامل \* قیمت سوخت = هزینه سوخت  
در رابطه بالا قیمت سوخت می‌تواند بر حسب مورد، قیمت داخلی و یا قیمت وارداتی آن باشد.

با توجه به توضیحات فوق هزینه سالانه نیروگاه‌های مختلف بر حسب دلار بر کیلووات - سال به صورت زیر محاسبه می‌شود.  
(۶)

$$\text{TotalCost} (\$/Kw.year) = \text{AIC} (\$/Kw.year) + \text{Fixed O \& M} (\$/Kw.year) + \text{VarCost} (\$/Mwh) * 8.76 * CF$$

که در آن AIC: هزینه سالانه سرمایه‌گذاری، Fixed O&M: هزینه ثابت تعمیر و نگهداری، Var Cost: هزینه متغیر شامل تعمیر و نگهداری، سوخت و آلاینده‌ها، CF: ضریب ظرفیت است.

### ۵- داده‌ها و اطلاعات استفاده شده جهت بررسی رقابت‌پذیری نیروگاه‌های هسته‌ای

**هزینه فرصت گاز:** هزینه فرصت را هزینه چشم‌پوشی از یک گزینه در قبال گزینه انتخاب شده، تعریف می‌کنند. هزینه فرصت گاز طبیعی در ایران به نوعی چشم‌پوشی از گزینه‌هایی همچون صادرات از طریق لوله و یا به صورت GTL و LNG به جای استفاده از گاز طبیعی بعنوان سوخت نیروگاه‌ها می‌باشد.

بنابر نظر کارشناسان، آینده دورتر تجارت جهانی گاز تا حد زیادی در گرو توسعه LNG و GTL خواهد بود که هر دو روش پر هزینه هستند و فناوری‌های پیشرفته‌ای لازم دارند البته ایران هم طرح‌هایی در این زمینه در دست بررسی و اقدام دارد، اما فناوری آنها انحصاری است و ممکن است در شرایط کنونی دسترسی به آنها برای ایران وجود نداشته باشد. لذا تجارت جهانی گاز تا چند دهه آینده به وسیله خطوط لوله خواهد بود. بنابراین محتمل‌ترین گزینه برای هزینه فرصت صادرات گاز کشور همان گزینه صادرات از طریق خط لوله است که در اینجا به بررسی هزینه فرصت آن پرداخته می‌شود. بر طبق گزارش چشم انداز انرژی ۲۰۰۷، منتشر شده توسط وزارت انرژی آمریکا برای فاصله زمانی سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۳۰، محدوده قیمت جهانی گاز بین ۴ تا ۸ دلار به ازای هر میلیون بی‌تی‌یو، معادل ۱۴-۲۸ سنت بر متر مکعب پیش بینی شده است [11]. البته لازم به ذکر است قیمت فعلی گاز (۲۰۰۸) حدود ۴۰ سنت بر متر مکعب است.

ممکن است به نظر برسد (و بعضاً بر این باورند) که همین قیمت جهانی، هزینه فرصت گاز برای کشور ما است ولی این فرض با توجه به توضیحات زیر موجه نمی‌باشد.

- براساس آمار فعلی، ذخایر قابل استحصال گاز طبیعی ایران ۲۸/۱۷ تریلیون متر مکعب در پایان سال ۱۳۸۴ برآورد شده است که ۳۲/۸ درصد از این ذخایر به میداین مناطق خشکی و ۶۷/۲ درصد به میداین مناطق دریایی اختصاص دارد [۳].

- میزان تولید گاز ایران در سال ۱۳۸۴ معادل ۸۷ میلیارد متر مکعب بوده است که از این میزان حدود ۴/۷ میلیارد متر مکعب آن به ترکیه صادر شده و حدود ۵/۲ میلیارد متر مکعب از ترکمنستان وارد شده است که به نوعی بیانگر توازن بین صادرات و واردات است. لذا در حال حاضر با توجه به میزان کم تولید نسبت به ذخایر کشور (حدود ۰/۰۰۳) در کوتاه مدت امکان صادرات قابل توجه برای کشور وجود ندارد.

- همچنین بنا بر اعلام شرکت ملی صادرات گاز ایران، میزان صادرات گاز طبیعی به ترکیه در سال ۲۰۰۷ به بیشترین میزان قراردادی یعنی حدود ۱۰ میلیارد متر مکعب رسیده است که این میزان تا سال ۲۰۲۶ میلادی ادامه خواهد داشت. حجم واردات سالانه گاز طبیعی از ترکمنستان نیز طبق برنامه‌ریزی‌ها می‌بایست تا سال ۲۰۰۸ به ۱۴ میلیارد متر مکعب افزایش یافته که بر هم زننده توازن بین صادرات و واردات است. از دیگر پروژه‌های صادراتی، صادرات به ارمنستان است که با ۵۰۰ میلیون متر مکعب در سال ۲۰۰۷ آغاز شده است و تا دو میلیارد و سیصد میلیون متر مکعب قابل افزایش است. از طرفی قرارداد خط لوله صلح ایران- هند- پاکستان نیز در حال نهایی شدن است که

در فاز اول آن ۶۰ میلیون متر مکعب در روز خواهد بود که در فاز نهایی به ۱۵۰ میلیون متر مکعب در روز معادل ۵۴ میلیارد متر مکعب در سال خواهد رسید. اما هنوز احداث این خط آغاز نشده و مدت زمان انجام پروژه به درستی مشخص نیست. لذا با توجه به نکات فوق میزان صادرات گاز ایران بخش بسیار کمی از ذخایر ما را تشکیل می‌دهد و لذا در بلند مدت نیز امکان صادرات قابل توجه نسبت به ذخایر قطعی کشورمان، بدلیل مشکلات موجود در بخش تولید وجود ندارد. بنابراین با توجه به محدودیت امکان صادرات قابل توجه در دو سناریوی کوتاه و بلند مدت، هزینه فرصت گاز ایران با توجه به روندی که مشاهده می‌شود تقریباً صفر است. با این وجود، در این مقاله رقابت‌پذیری نیروگاه‌های هسته‌ای به ازای قیمت‌های مختلف گاز بررسی شده است.

## ۶- بررسی رقابت‌پذیری نیروگاه‌های هسته‌ای

در اینجا با توجه به توضیحات دو بخش قبل و جدول شماره ۲ که در انتهای مقاله آورده شده، رقابت‌پذیری اقتصادی نیروگاه‌های هسته‌ای در کشور مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور ابتدا یک گزینه به عنوان گزینه مبنا انتخاب شده و سپس سعی شده تا با انجام مطالعات حساسیت حول تمام پارامترها، مرز توجیه‌پذیری اقتصادی این نیروگاه‌ها در هر حالت مشخص شود.

محدوده بررسی پارامترها عبارت است از: هزینه سرمایه‌گذاری نیروگاه‌های هسته‌ای: از ۱۵۰۰\$/KW تا ۲۵۰۰\$/KW

قیمت گاز طبیعی: به ازای هر متر مکعب از ۴ تا ۲۲ سنت

نرخ تنزیل: ۵ و ۱۰ درصد، مدت زمان احداث نیروگاه: ۷، ۵ و ۹ سال

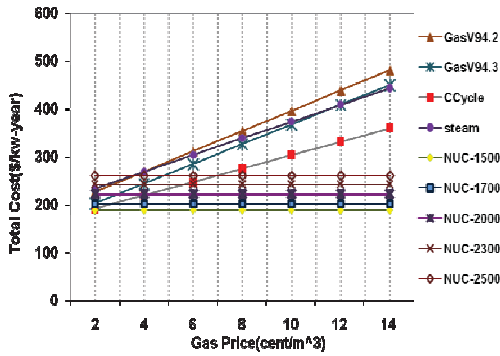
هزینه تعمیر و نگهداری: ۴۰\$/KW-year تا ۶۰\$/KW-year

با توجه به ثبات نسبی قیمت سوخت نیروگاه‌های هسته‌ای و همچنین پایین بودن سهم هزینه سوخت در هزینه تمام شده برق تولیدی از نیروگاه‌های هسته‌ای، در تمام محاسبات هزینه سوخت نیروگاه‌های هسته‌ای ثابت و برابر با ۵/۵\$/MWh در نظر گرفته شده است.

ذکر این نکته ضروری است که از نظر آژانس بین‌المللی انرژی اتمی هزینه احداث نیروگاه‌های هسته‌ای برای کشورهای وارد کننده این تکنولوژی حدوداً ۱/۷ برابر هزینه‌های اعلام شده در کشورهای سازنده آن است که در گزارشات بین‌المللی آمده است. در مورد ایران آمار رسمی منتشر نشده است اما بر اساس گزارشات غیر رسمی حداقل هزینه احداث نیروگاه‌های جدید، حدود ۳۵۰۰ دلار به ازای هر کیلو وات ظرفیت نصب شده است. با این وجود با توجه به روندی که در این مقاله دنبال شده و مقایسه‌ها در قیمت‌های مختلف صورت گرفته است با هر استنباطی از هزینه تمام شده این نیروگاه‌ها، می‌توان به آسانی حدود تقریبی از نقطه سر به سر هزینه احداث و قیمت گاز و در نتیجه رقابت‌پذیری آنها را بدست آورد.

**گزینه مبنا:**

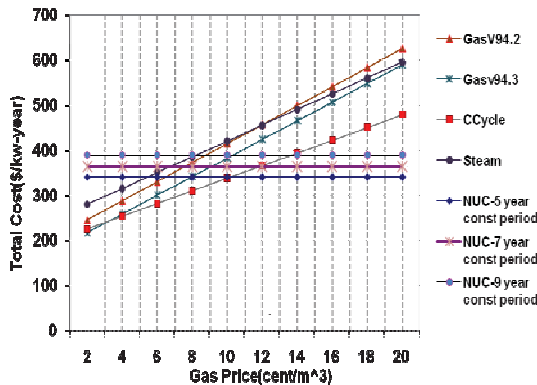




شکل (۴): رقابت پذیری نیروگاه هسته‌ای در شرایط نرخ تنزیل ۵٪، ضریب ظرفیت ۸٪. به ازای هزینه سرمایه‌گذاری متغیر

شکل ۴ مقایسه فوق را در نرخ تنزیل ۵ درصد نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که نقطه سر به سر قیمت گاز برای رقابت‌پذیری نیروگاه‌های هسته‌ای در این حالت از ۲ تا ۷ سنت تغییر می‌کند. البته باید در نظر داشت که این حالت حداقل برای کشور ما (به دلیل محدودیت سرمایه) دور از انتظارات و تنها برای نشان دادن تاثیر نرخ تنزیل در اینجا آورده شده است. یکی از علل اصلی رقابت‌پذیری نیروگاه‌های هسته‌ای در کشورهای توسعه یافته همین پایین بودن نرخ تنزیل است.

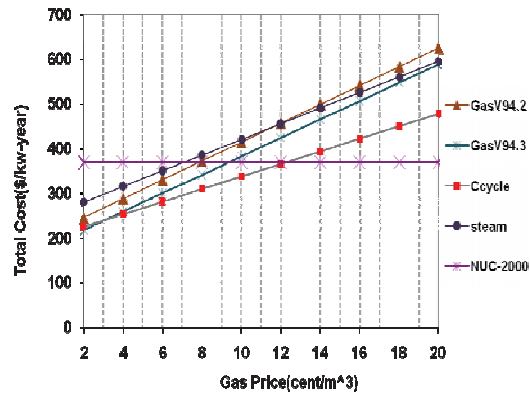
## ۶-۲- تحلیل حساسیت نسبت به مدت زمان ساخت نیروگاه‌های هسته‌ای



شکل (۵): رقابت پذیری نیروگاه هسته‌ای در شرایط مبنا، با تغییر مدت زمان ساخت نیروگاه ۵، ۷، ۹

شکل ۵ نشان می‌دهد که با در نظر گرفتن گزینه مبنا، در بار پایه و به ازای مدت زمان ساخت ۹ سال نقطه سر به سر قیمت گاز و هزینه سرمایه‌گذاری از ۱۲ سنت در گزینه مبنا به ۱۴ سنت افزایش می‌یابد و این در حالی است که به ازای مدت زمان ساخت ۵ سال این نقطه از ۱۲ سنت در گزینه مبنا به ۱۰ سنت کاهش می‌یابد. علت تغییر هزینه سرمایه‌گذاری، همان تغییر ضریب بهره دوران ساخت است که با توجه

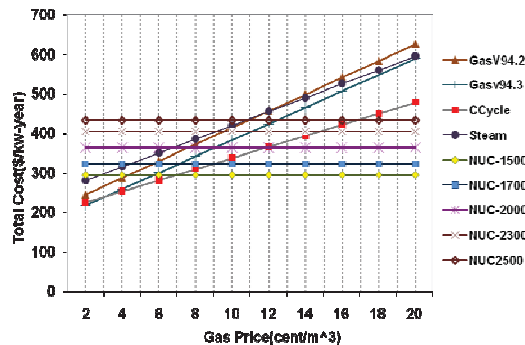
هزینه سرمایه‌گذاری:  $2000 \$/KW$  (هزینه سرمایه‌گذاری نیروگاه‌هایی که در سال‌های اخیر در آسیای شرقی ساخته شده است)، نرخ تنزیل: ۱۰٪ (نرخ تنزیل معمول برای کشورهای در حال توسعه) دوره احداث: ۷ سال (حداقل زمان ساخت نیروگاه هسته‌ای) هزینه تعمیر و نگهداری:  $50 \$/KW\text{-year}$  (متوسط هزینه تعمیر و نگهداری کشورهای OECD) هزینه سوخت:  $5 \$/MWh$  (با فرض راندمان ۳۴ درصد)



شکل (۲): رقابت پذیری نیروگاه هسته‌ای در شرایط گزینه مبنا

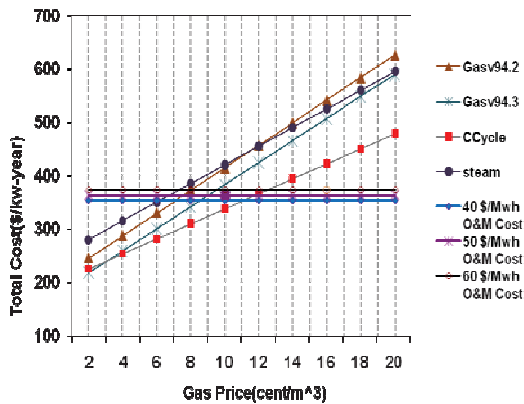
با توجه به شکل ۲ در شرایط گزینه مبنا نیروگاه هسته‌ای به ازای قیمت گاز بیش از ۱۲ سنت بر متر مکعب رقابت‌پذیر است.

## ۶-۱- تحلیل حساسیت نسبت به هزینه سرمایه‌گذاری در نرخ‌های تنزیل ۱۰ و ۵ درصد



شکل (۳): رقابت پذیری نیروگاه هسته‌ای در شرایط نرخ تنزیل ۱۰٪، ضریب ظرفیت ۸٪. به ازای هزینه سرمایه‌گذاری متغیر

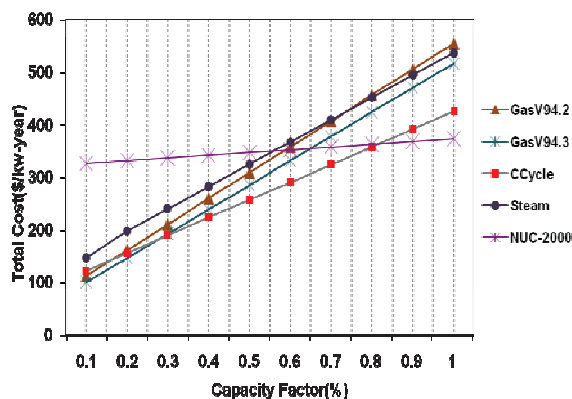
شکل ۳ نشان می‌دهد که با در نظر گرفتن گزینه مبنا و تنها با تغییر هزینه سرمایه‌گذاری از  $1500 \$/KW$  تا  $2500 \$/KW$  نقطه سر به سر قیمت گاز برای رقابت‌پذیری نیروگاه‌های هسته‌ای از ۷ تا ۱۷ سنت تغییر می‌کند.



شکل (۷): رقابت پذیری نیروگاه هسته‌ای در شرایط گزینه مبنا، به ازای تغییر هزینه تعمیر و نگهداری

### ۷- رژیم کاری مناسب نیروگاه‌های هسته‌ای

با توجه به نمودار شکل ۸ به ازای ضریب ظرفیت کمتر از ۳٪ نیروگاه گازی و به ازای ضریب ظرفیت بین ۳٪ تا ۸۳٪، نیروگاه سیکل ترکیبی و به ازای ضریب ظرفیت بیش از ۸۳٪، نیروگاه هسته‌ای برای بارگیری اقتصادی‌تر است؛ بنابراین نیروگاه‌های هسته‌ای تنها در بار پایه و در ضرایب بار بالا اقتصادی است.

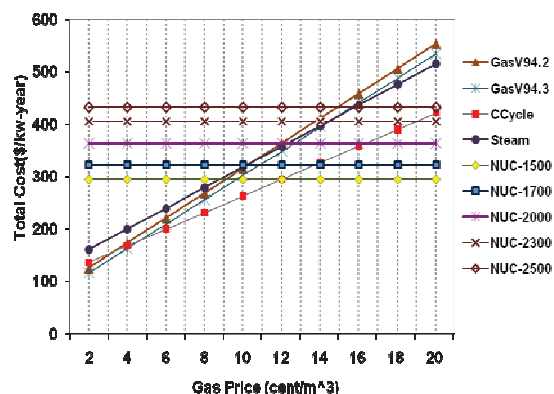


شکل (۸): رژیم کاری مناسب نیروگاه‌های هسته‌ای در گزینه مبنا

به شکل شماره (۱) برای ۵ سال ۱/۲۳، ۷ سال ۱/۳۵ و ۹ سال ۱/۴۷ منظور شده است. لذا با فرض ساخت یک نیروگاه ۱۰۰۰ مگاواتی با هزینه سرمایه‌گذاری ۲۰۰۰ \$/KW، دو سال تاخیر منجر به تحمیل حداقل هزینه ۲۴۰ میلیون دلار به پروژه خواهد شد و این اهمیت انجام به موقع پروژه را می‌رساند.

### ۶-۳- تحلیل حساسیت نسبت به هزینه آلاینده‌ها

شکل ۶ نشان می‌دهد که با در نظر گرفتن گزینه مبنا و بدون در نظر گرفتن هزینه آلاینده‌ها، با تغییر هزینه سرمایه‌گذاری از ۱۵۰۰ \$/KW تا ۲۵۰۰ \$/KW، نقطه سر به سر قیمت گاز برای رقابت‌پذیری نیروگاه‌های هسته‌ای از ۱۳ تا ۲۲ سنت تغییر می‌کند به عبارت دیگر رقابت‌پذیری نیروگاه‌های هسته‌ای به شدت کاهش می‌یابد. با توجه به شرایط فعلی به نظر می‌آید که واقعی‌ترین حالت برای بررسی رقابت‌پذیری نیروگاه‌های هسته‌ای در ایران حالت فوق است زیرا از یک طرف نرخ بهره برای کشورهایی نظیر ما معمولاً ۱۰ درصد در نظر گرفته می‌شود و از طرف دیگر هنوز قوانین زیست محیطی از جمله مالیات کربن برای کشور ما الزامی نشده است. با این وجود در محاسبات گزینه مبنا، مالیات آلاینده‌ها لحاظ شده است.

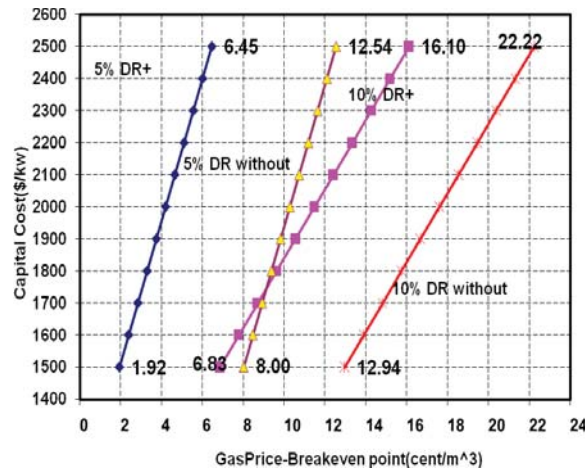


شکل (۶): رقابت پذیری نیروگاه هسته‌ای در نرخ تنزیل ۱۰٪، ضریب ظرفیت ۸۰٪، با تغییر هزینه سرمایه‌گذاری (بدون هزینه آلاینده)

### ۶-۴- تحلیل حساسیت نسبت به هزینه تعمیر و نگهداری

#### نگهداری

در اینجا با در نظر گرفتن گزینه مبنا، تحلیل حساسیت به ازای ۲۰ درصد افزایش و کاهش هزینه تعمیر و نگهداری انجام شده است که نتیجه آن در شکل ۷ نشان داده شده است. لذا در شرایط گزینه مبنا به ازای تغییر ۱۰ \$/kw در هزینه تعمیر و نگهداری، قیمت سر به سر گاز و هزینه سرمایه‌گذاری حدوداً ۸٪ سنت تغییر می‌کند.



شکل (۹): محدوده رقابت پذیری نیروگاه هسته‌ای به ازای نرخ تنزیل ۱۰ و ۵٪، ضریب ظرفیت ۸۰٪ (با و بدون احتساب هزینه آلاینده‌ها)

## ۸- بحث نتایج

شکل ۹ رقابت دو نیروگاه هسته‌ای و سیکل ترکیبی (به عنوان بهترین گزینه نیروگاه‌های حرارتی غیر اتمی) را به ازای تغییر دو پارامتر مهم هزینه‌های آنها یعنی هزینه سرمایه‌گذاری نیروگاه‌های هسته‌ای و هزینه سوخت نیروگاه‌های سیکل ترکیبی در نرخ‌های تنزیل ۵ و ۱۰ درصد و شرایط در نظر گرفتن یا نگرفتن هزینه آلاینده‌ها نشان می‌دهد. با توجه به نمودار، با تغییر هزینه سرمایه‌گذاری از ۱۵۰۰ تا ۲۵۰۰ دلار به ازای هر کیلووات ظرفیت نصب شده نیروگاه‌های هسته‌ای (با نرخ تنزیل ۵ درصد و در نظر گرفتن مالیات آلاینده‌ها) نقطه سر به سر قیمت گاز برای رقابت‌پذیری نیروگاه‌های هسته‌ای از ۲ تا ۶/۵ سنت تغییر می‌کند؛ و با نرخ تنزیل ۱۰ درصد، نقطه سر به سر قیمت گاز برای رقابت‌پذیری نیروگاه‌های هسته‌ای از ۷ تا ۱۷ سنت تغییر می‌کند. از طرفی در صورت عدم در نظر گرفتن مالیات آلاینده‌ها و با نرخ تنزیل ۵٪، نقطه سر به سر قیمت گاز برای رقابت‌پذیری نیروگاه‌های هسته‌ای از ۸ تا ۱۳ سنت و با نرخ تنزیل ۱۰ درصد از ۱۳ تا ۲۲ سنت تغییر می‌کند. لذا با در نظر گرفتن نرخ بهره ۱۰ درصد و حداقل هزینه سرمایه‌گذاری (۱۵۰۰ دلار بر مگاوات) نیروگاه‌های هسته‌ای به ازای قیمت گاز کمتر از ۷ سنت بر متر مکعب رقابت‌پذیر نیستند.

## ۹- نتیجه‌گیری

تصمیم‌گیری جهت سرمایه‌گذاری‌های بزرگ از جمله ساخت نیروگاه‌های هسته‌ای و ظرفیت بهینه آنها در کشور متأثر از سیاست‌گذاری‌های مملکتی و عوامل متعددی (از جمله عوامل اقتصادی، سیاسی، اجتماعی، امنیتی و...) می‌باشد؛ که در این مقاله صرفاً رقابت‌پذیری اقتصادی نیروگاه‌های هسته‌ای در ایران در مقایسه با نیروگاه‌های با سوخت فسیلی، مورد تحلیل قرار گرفته است. یافته‌های مهم این مطالعه چنین است:

- ۱- هزینه سرمایه‌گذاری، مهم‌ترین مولفه تاثیرگذار در هزینه تمام شده برق تولیدی از نیروگاه‌های هسته‌ای است. (۷۰-۵۰ درصد هزینه تمام شده برق تولیدی)
- ۲- پایین بودن سهم هزینه سوخت برترین مزیت نیروگاه‌های هسته‌ای نسبت به نیروگاه‌های با سوخت فسیلی است. (۱۰-۲۰ درصد)
- ۳- قیمت گاز مهم‌ترین نقش را در رقابت‌پذیری سایر نیروگاه‌ها با نیروگاه‌های هسته‌ای در ایران دارد.
- ۴- هزینه فرصت گاز در کشور ما بدلیل پایین بودن میزان صادرات نسبت به ذخایر موجود کشور تقریباً صفر است. لذا در محاسبات رقابت‌پذیری نیروگاه‌ها، قیمت تمام شده گاز برای ایران، باید مورد استفاده قرار گیرد.

- ۵- با در نظر گرفتن مالیات آلاینده‌ها (به میزان مالیات‌های متداول در سطح بین‌المللی)، نرخ تنزیل ۱۰ درصد و هزینه سرمایه‌گذاری ۱۵۰۰ دلار به ازای هر کیلووات ظرفیت نصب شده نیروگاه‌های هسته‌ای، حداقل قیمت گاز، برای رقابت‌پذیری نیروگاه‌های هسته‌ای حدود ۷ سنت به ازای هر متر مکعب خواهد بود. با افزایش هزینه سرمایه‌گذاری از ۱۵۰۰ به ۲۰۰۰ دلار، این قیمت به حدود ۱۰ سنت و با افزایش از ۲۰۰۰ به ۲۵۰۰ دلار به ۱۷ سنت به ازای هر متر مکعب افزایش می‌یابد. بنابراین افزایش هر چه بیشتر هزینه فرصت گاز موجب افزایش قابل توجه رقابت‌پذیری نیروگاه‌های هسته‌ای در کشور خواهد شد.
- ۶- با توجه به تحلیل‌های ارائه شده و نتایج بدست آمده، زمینه لازم برای تعریف سناریوهای مناسب، در جهت یافتن ظرفیت بهینه این نیروگاه‌ها در یک افق زمانی ۱۰ الی ۲۰ ساله با استفاده از کدهای معتبر همچون Message، WASP فراهم می‌گردد.

## مراجع:

- [۱] غفرانی، محمد باقر، طرح مطالعاتی مقایسه فنی اقتصادی نیروگاه‌های هسته‌ای، ویراست ۲، دانشگاه صنعتی شریف آبان ۱۳۸۵
- [۲] اطلاعات فنی اقتصادی نیروگاه‌های کشور، دفتر برنامه‌ریزی تولید، شرکت توانیر، ۱۳۸۵
- [۳] دفتر برنامه‌ریزی انرژی وزارت نیرو، ترازنامه انرژی ۱۳۸۴
- [۴] گزارش پروژه تدوین استراتژی نیروگاه‌های هسته‌ای، ویرایش سوم، پژوهشگاه نیرو، خرداد ۱۳۸۵ (منتشر نشده).
- [5] The Role of Nuclear Power in Europe. World Energy Council, January 2007
- [6] The New Economics of Nuclear Power. World Nuclear Association. 2007
- [7] Projected Cost of Generating Electricity. IEA and OECD\_NEA. 20051
- [8] IEA Energy Technology Essentials-Nuclear Power. Energy Information Administration. March 2007



[10] Energy Outlook 2007. International Energy Association. American Ministry of Energy  
 [11] Economic Performance Indicators for Nuclear Power. Technical Report Series No.437. IAEA. 2

[9] The Economics of Nuclear Power. World Nuclear Association Report. Briefing paper. Feb 2007

جدول (۲): اطلاعات فنی اقتصادی نیروگاه‌های کشور

هزینه تعمیرات و نگهداری (بدون سوخت)		هزینه احداث		هزینه آلاینده <sup>۱</sup> US\$/Mwh		راندمان (درصد)	ضریب دسترسی (درصد)	عمر نیروگاه (سال)	زمان احداث (سال)	نوع نیروگاه
متغیر	ثابت سالانه	RIs/kW	US \$/kW	NOx	Co2					
۱/۹	۱۰/۴	۶۷۸۶۳۱	۳۴۳	۳/۳	۱۴/۸	۳۳/۴	۹۷	۲۰	۲	گازی کوچک (V94.2)
۲/۱	۸	۱۲۰۰۴۱۹	۲۲۴	۲/۸	۱۲/۷	۳۹	۸۴	۲۰	۲	گازی بزرگ (V94.3)
۱/۱	۲۰/۲	۲۰۴۹۰۰۰	۴۰۱	۱/۹	۱۱/۱	۵۰	۸۲	۳۰	۴	سیکل ترکیبی
۲/۴	۶/۵	۲۳۴۷۱۱۷	۵۲۲	۶/۲	۱۱/۸	۴۱/۲	۷۸	۴۰	۵	بخاری
۱/۶	۴۵	--	۲۰۰۰	--	---	۳۴	۸۰	۴۰	۷	هسته‌ای

۱- هزینه آلاینده‌ها بر مبنای محاسبات مرجع [7] و با فرض مالیات 20€/ton برای کربن 4600€/ton، برای NOx منظور شده-اند.

Overnight Cost  
 Interest During Construction (IDC)  
 Levelized Cost