

ارائه مدل مدیریت منابع انرژی

(با استفاده از روش برنامه ریزی خطی)

کد موضوعی: ۳۱۰

شماره مسلسل: ۱۳۷۸۱

مهرماه ۱۳۹۳

معاونت پژوهش‌های زیربنایی و امور تولیدی

دفتر: مطالعات انرژی، صنعت و معدن

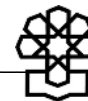
به نام خدا

فهرست مطالب

چکیده.....	۱
مقدمه.....	۲
فصل اول - منابع مختلف انرژی.....	۵
۱-۱. انرژی ورودی به زمین.....	۵
۱-۱-۱. انرژی خورشید.....	۶
۱-۱-۲. انرژی درون زمین.....	۶
۱-۱-۳. انرژی جاذبه.....	۷
۱-۱-۴. جریان انرژی در سطح زمین.....	۷
۱-۱-۵. جریان انرژی روی سطح زمین.....	۷
۱-۱-۶. انرژی ذخیره شده در سوخت فسیلی.....	۸
۱-۲. الکتریسیته.....	۸
۱-۲-۱. برخی ارتباطات اساسی الکتریکی.....	۸
۱-۲-۲. تولید الکتریسیته.....	۹
۱-۲-۳. مکان نیروگاه الکتریکی.....	۹
۱-۳. انرژی هسته‌ای.....	۱۱
۱-۳-۱. نگرانی‌های زیست‌محیطی.....	۱۱
۱-۳-۲. فضولات.....	۱۲
۱-۴. زغال سنگ.....	۱۳
۱-۴-۱. ترکیب و جایگاه زغال سنگ.....	۱۳
۱-۴-۲. استخراج زغال سنگ.....	۱۴
۱-۴-۳. حمل زغال سنگ.....	۱۵
۱-۴-۴. آثار زیست‌محیطی زغال سنگ.....	۱۶
۱-۵. نفت.....	۱۷
۱-۵-۱. تاریخ و پیشرفت صنعت نفت.....	۱۷
۱-۵-۲. هفت خواهران نفتی.....	۱۸
۱-۵-۳. میدان نفتی اروپا.....	۱۸
۱-۵-۴. اوپک.....	۱۹
۱-۵-۵. مسائل زیست‌محیطی.....	۱۹
۱-۶. گاز طبیعی.....	۲۰

۲۱	۱-۶-۱. تاریخ و گسترش.....
۲۱	۱-۶-۲. منابع گاز طبیعی
۲۲	۱-۶-۳. جنبه‌های زیست‌محیطی گاز طبیعی
۲۳	۱-۷. انرژی زمین‌گرمایی
۲۳	۱-۷-۱. ساختار زمین‌شناسی زمین
۲۵	۱-۷-۲. منشأ جریان زمین‌گرمایی
۲۵	۱-۷-۳. منابع انرژی زمین‌گرمایی.....
۲۶	۱-۷-۴. منابع زمین‌گرمایی
۲۷	۱-۷-۵. مکان و نوع منابع زمین‌گرمایی.....
۲۸	۱-۷-۶. ویژگی‌های زیست‌محیطی نیروی زمین‌گرمایی.....
۲۹	۱-۷-۷. حفاظت از آب‌های زیرزمینی.....
۲۹	۱-۸. انرژی آبی.....
۳۰	۱-۸-۱. تولید نیروی الکتریکی آبی
۳۱	۱-۸-۲. تأثیرات زیست‌محیطی
۳۱	۱-۹. انرژی باد.....
۳۲	۱-۹-۱. سیستم‌های مدرن انرژی بادی
۳۲	۱-۹-۲. شروع توربین‌های بادی.....
۳۳	۱-۹-۳. تجهیزات بزرگ نیروی باد
۳۵	۱-۹-۴. موافقان و مخالفان نیروگاه‌های بادی.....
۳۵	۱-۹-۵. تأثیرات زیست‌محیطی
۳۷	۱-۱۰. انرژی خورشیدی
۳۷	۱-۱۰-۱. تابش از خورشید
۳۸	۱-۱۰-۲. تفاوت فصلی تابش خورشیدی.....
۳۹	۱-۱۰-۳. طبقه‌بندی مجموعه انرژی خورشیدی.....
۴۰	۱-۱۰-۴. آب گرم‌کن‌های خورشیدی (خانگی).....
۴۲	۱-۱۰-۵. سلول‌های فتوولتائیک خورشیدی
۴۵	۱-۱۱. انرژی زیستی و انرژی شیمیایی
۴۵	فصل دوم - بررسی ظرفیت و تولید انرژی جهان.....
۴۶	۲-۱. بررسی حجم منابع فسیلی.....
۴۶	۲-۱-۱. نفت
۵۰	۲-۲. گاز طبیعی.....
۵۴	۲-۳. زغال‌سنگ
۵۷	۲-۴. انرژی‌های نو.....

فصل سوم - هزینه تولید برق از منابع مختلف انرژی	۶۲
۳-۱. روش تحقیق	۶۲
۳-۲. هزینه میانگین چرخه عمر	۶۲
فصل چهارم - خلق مدل بهینه الگوی تولید انرژی	۶۴
۴-۱. ترسیم نمودار	۶۶
۴-۱-۱. محور پایداری نمودار	۶۶
۴-۱-۲. محور زیست محیطی	۷۱
۴-۱-۳. محور مالی	۷۵
۴-۲. رسم نمودار	۷۸
۴-۳. خلق مدل	۸۰
۴-۳-۱. پیش فرض های مدل	۸۰
۴-۳-۲. مقدمه ای بر مدل	۸۱
فصل پنجم - حل مدل	۸۳
منابع و مآخذ	۹۰



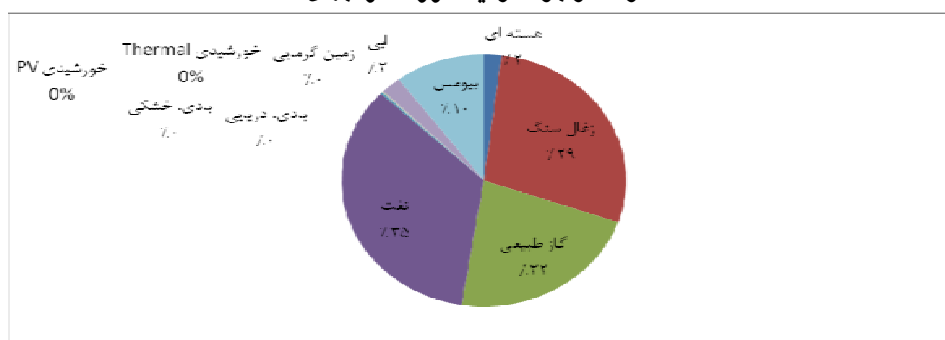
ارائه مدل مدیریت منابع انرژی (با استفاده از روش برنامه‌ریزی خطی)

چکیده

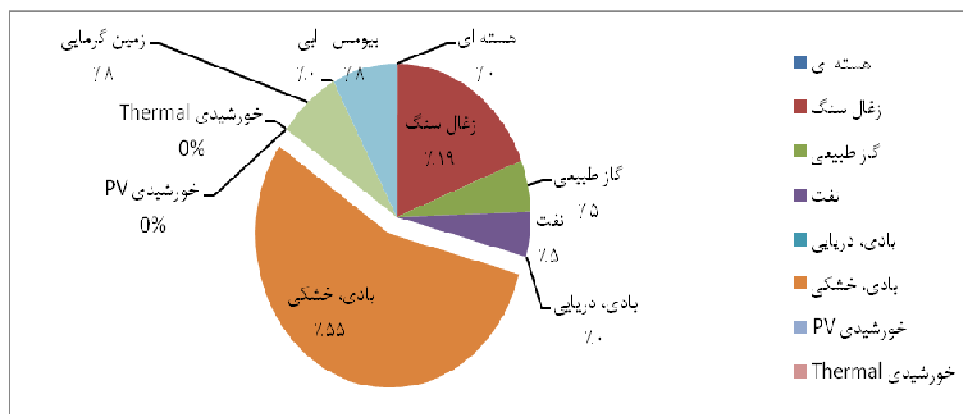
این تحقیق با استفاده از یک مدل برنامه‌ریزی خطی در ریاضیات، الگوی بهینه استفاده از منابع انرژی را ارائه می‌دهد. پایداری منابع انرژی، کاهش تخریب محیط زیست و همچنین فاکتور هزینه، محدودیت‌هایی هستند که برای این مدل در نظر گرفته شده‌اند. سه شاخص دشمنی با محیط زیست، پایداری و هزینه تولید انرژی، به‌منظور طراحی معادلات مدل طراحی شده‌اند. این شاخص‌ها وظیفه ارزیابی، مقایسه و رتبه‌دهی به هریک از منابع انرژی را دارند و در فصل پایانی با اجرای مدل برنامه‌ریزی خطی، الگوی بهینه بهره‌برداری از منابع انرژی ارائه شده است.

یازده منبع انرژی ازجمله منابع فسیلی چون نفت و گاز و زغال‌سنگ و همچنین منابع تجدیدپذیر چون آبی، بادی، خورشیدی و... در محاسبات به‌کار گرفته شده‌اند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که با توجه به وضعیت موجود منابع انرژی جهان، هزینه‌های تولید هریک از منابع و همچنین تأثیرات زیست‌محیطی آنها، جهان باید به سمت تولید هرچه بیشتر انرژی‌های بادی و آبی رود و حتی‌الامکان از تولید منابع فسیلی کاهش دهد. بالعکس تصور اکثریت با توجه به هزینه بالای انرژی خورشیدی افزایش تولید از این منابع با توجه به شرایط کنونی برای کل جهان توصیه نمی‌شود. البته این مهم در مورد همه کشورها به‌صورت مستقل صدق نمی‌کند و باید مدل مذکور به‌صورت مجزا با توجه به شرایط و ظرفیت‌های آن کشور محاسبه و اجرا شود. شکل زیر الگوی تولید انرژی جهان را نشان می‌دهد. این الگو بیشتر بر مبنای هزینه کمتر ایجاد شده، اما خسارت‌های زیادی را به محیط زیست وارد می‌کند. به‌علاوه سهم بالای انرژی‌های فسیلی در این الگو، عدم پایداری آن را نشان می‌دهد.

الگوی موجود تولید انرژی در جهان



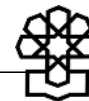
مدل تهیه شده در این تحقیق برای محاسبه الگوی بهینه تولید انرژی به کار رفته است. سناریوهای مختلفی فرض شده که اگر سناریو پایداری ۱۰۰ ساله را در نظر بگیریم به الگوی زیر خواهیم رسید.



همان‌طور که از نمودار بالا پیداست در الگوی بهینه نسبت به سال ۲۰۱۲ از درصد منابع فسیلی کاسته شده و به منابع بادی و زمین‌گرمایی اضافه شده است. برای دستیابی به این الگو باید ظرفیت هریک از منابع بادی خشکی و زمین‌گرمایی به ترتیب به ۵۵/۴۶ و ۷/۵۲ درصد افزایش یابد. این درحالی است که سهم هر یک از منابع زغال‌سنگ، گاز طبیعی، نفت و بایومس به ترتیب به ۹/۴۲، ۱۶/۶۵، ۲۹/۸۶ و ۲/۳۹ درصد کاهش می‌یابد.

مقدمه

«تا چه زمانی منابع انرژی فسیلی در دسترس خواهند بود؟» این سؤالی است که همواره با افزایش نیاز بشر به منابع انرژی پررنگ‌تر می‌شود. رشد روزافزون اقتصادی کشورهای درحال توسعه، افزایش جمعیت، رفاه و توسعه، تقاضا برای صنعت حمل‌ونقل همه و همه خبر از افزایش نیاز بشر به منابع انرژی می‌دهد. به گفته بیشتر کارشناسان، جهان مرحله پیک نفتی را گذرانده و به نیمه دوم تولید از منابع نفتی رسیده است. این بیانگر ناکافی بودن منابع انرژی فسیلی به عنوان مهمترین منابع تولید انرژی بشر است. به علاوه تولید گازهای گلخانه‌ای ناشی از سوختن منابع فسیلی خسارات جبران‌ناپذیری را به این منابع وارد کرده است. به گفته کارشناسان ادامه این روند ممکن نخواهد بود.



دسترسی به مدل بهینه تولید انرژی و همچنین تعریف نقشه جامع تولید انرژی همواره یکی از مسائل پربحث بین خبرگان و نخبگان حوزه انرژی بوده است. اینکه هر کشوری از کدام منابع انرژی و به چه میزان استفاده کند تا بیشترین بازده ممکن را داشته باشد از نکات قابل توجه بوده است. اما باید پرسید که در استفاده از منابع انرژی صرف دسترسی به انرژی کفایت کرده و یا عوامل دیگری نیز حائز اهمیت است. به عنوان مثال کشور ایران با داشتن منابع سرشار نفت و گاز قابلیت دسترسی به انرژی ارزان را دارد، اما مشکلات زیست محیطی که مصرف این منابع برای کشور ایجاد می کند هنگفت است. بدین معنا که هزینه های زیست محیطی و اکولوژیکی استفاده از این منابع محیط زیست کشور را نه تنها در حال حاضر بلکه تا نسل های بعد تهدید می کند. از سوی دیگر منابع طبیعی نفت و گاز، منابعی خدادادی است که متعلق به همه نسل ها بوده و آیندگان نیز باید از آن بهره ببرند. مضاف بر این با توجه به کاربردهای وسیع مشتقات نفتی در زندگی بشری استفاده از این منابع به عنوان منبع انرژی سوء بهره وری از این ثروت است. باید توجه کرد که منابع هیدروکربوری ذخایری تمام شدنی است و به هر حال دیر یا زود این منابع به اتمام می رسد. با توجه به این نکته هیچگاه نمی توان به این منابع به عنوان ذخایر انرژی پایدار نگاه کرد. حال آنکه یکی از عوامل پایه ای در توسعه پایدار، دسترسی به منابع انرژی پایدار است. به همین دلیل است که امروز بیش از هر چیز بحران انرژی، توسعه کشورهای توسعه یافته را تهدید می کند.

با توجه به آنچه گفته شد ضرورت دسترسی به منبع انرژی پایدار و منطبق با محیط زیست ضروری به نظر می رسد. انطباق با محیط زیست از آن جهت اهمیت دارد که بدون داشتن محیط زیستی پایدار برای بشریت باز هم توسعه پایدار معنا پیدا نمی کند. گرم شدن زمین به دلیل انتشار گازهای گلخانه ای حاصل از سوختن سخت های فسیلی، حیات بشر را بر روی کره زمین تهدید می کند. به همین منظور به نظر می رسد که برای رسیدن به منبع انرژی پایدار نه تنها به ماهیت منبع بلکه به تأثیرات زیست محیطی نیز باید توجه شود. منابع انرژی تجدیدپذیر مانند بادی، آبی و خورشیدی پاسخی به حل این مشکل است. این منابع انرژی پایدار بوده و با محیط زیست همخوانی دارند. اما هزینه بالای دسترسی به این منابع و همچنین محدودیت های مکانی و تکنولوژیکی امکان استفاده از این منابع را محدود می کند. رشد روزافزون نیاز بشر به منبع انرژی ارزان لازمه ایجاد رفاه برای همه بشریت است. اما افزایش هزینه های انرژی هزینه سنگینی را به توسعه اقتصاد جهانی وارد خواهد کرد.

حال سؤال اینجاست که چگونه می شود به منبعی از انرژی که ارزان، پایدار و سازگار با محیط زیست باشد، دست یافت. مدل پیش رو تلاشی برای پاسخ به این سؤال است. واضح است که منابع انرژی طبیعی در حال حاضر مشخص است. البته ممکن است طی سالیان آینده با توسعه علم و

تکنولوژی دسترسی به منابع بی‌پایان ممکن شود، اما در حال حاضر این امر ممکن نیست. پس باید از منابع موجود به نحوی استفاده کرد تا منابع انرژی پایدار، ارزان و منطبق با محیط زیست داشت. مدل پیش رو با ارزیابی همه الگوهای مصرف انرژی، بهینه الگو را با استفاده از روش‌های برنامه‌ریزی خطی ارائه می‌دهد.

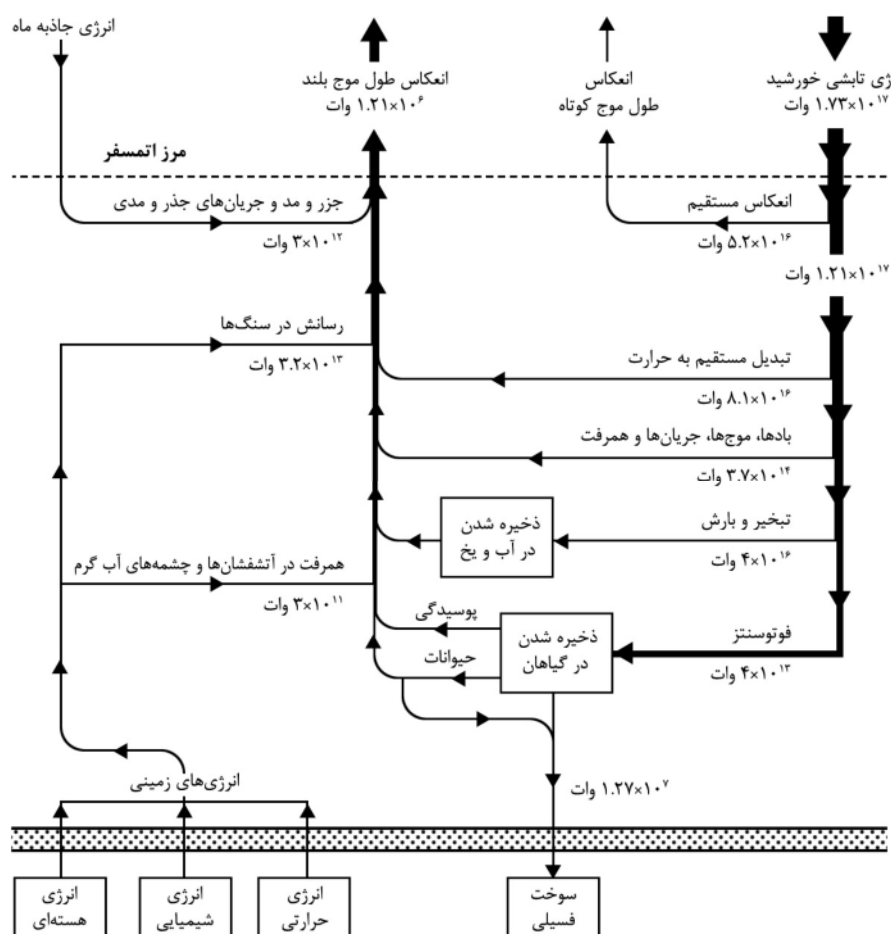
عدم پایداری منابع انرژی فسیلی و همچنین تأثیرات خطرناک استفاده از این منابع بر محیط زیست گزاره جایگزینی این منابع را با منابع تجدیدپذیر تقویت کرده است. منابع تجدیدپذیر پایدار بوده و خسارات بسیار کمتری به محیط زیست وارد می‌کنند. اما هزینه تولید انرژی از این منابع بالاتر از منابع فسیلی است و همچنین امکان برنامه‌ریزی بلندمدت برای استفاده از این منابع بدون پیشرفت تکنولوژی در ذخیره‌سازی انرژی وجود ندارد. به این معنا که به‌عنوان مثال امکان استفاده از انرژی خورشیدی در طول شب ممکن نیست اگر امکان ذخیره‌سازی در طول روز نباشد. به همین دلیل شبکه تقاضا در طول شب با مشکل تأمین انرژی روبرو خواهد بود. به‌علاوه در مورد انرژی بادی به‌دلیل تغییرات اقلیمی ممکن است یک ماه بیشتر از برنامه‌ریزی‌ها برق تولید شود و یک ماه کمتر از آن. به همین دلیل استفاده از منابع تجدیدپذیر بدون توسعه تکنولوژی ذخیره‌سازی با محدودیت روبرو می‌باشد.

با توجه به موارد مطرح شده ارائه یک الگوی بهینه تولید انرژی برق که متشکل از همه منابع انرژی از فسیلی و تجدیدپذیر به میزان بهینه باشد، ضروری به‌نظر می‌رسد. این الگوی بهینه با استفاده از یک شبکه هوشمند انتقال می‌تواند منابعی پایدار با کمترین خسارت به محیط زیست و با توجه به محدودیت‌های هزینه‌ای ارائه کند. این الگو بیان می‌کند که به چه میزان از هریک از منابع استفاده شود تا الگوی بهینه تولید ایجاد شود.

در این نوشتار در فصل اول با منابع انرژی آشنا خواهیم شد. سپس در فصل دوم با ارائه آمار ارقام دقیق وضعیت تولید انرژی جهان را بررسی خواهیم کرد. در فصل سوم با ارائه مدل مالی به شیوه مقایسه هزینه تولید الکتریسیته با تکنولوژی‌های مختلف خواهیم پرداخت. در فصل چهارم مدل بهینه‌سازی تولید انرژی خلق می‌شود. در نهایت در فصل پنجم این مدل برای تهیه الگوی تولید انرژی جهان به‌کار خواهد رفت.

۱-۱. انرژی ورودی به زمین

شکل ۱-۱. وضعیت تعادل طبیعی انرژی



Source: “Energy Studies”, Second Edition, W. Shepherd, Imperial College Press, London, 2005.

بر مبنای شکل بالا به صورت کلی سه منبع انرژی در جهان وجود دارد. اولین و مهمترین آن انرژی خورشید است. تشعشعات خورشید مهمترین منبع انرژی است که عموماً دیگر منابع انرژی مثل آبی و بادی نوع تغییر یافته آن هستند. انرژی حاصل از اجرام آسمانی به خصوص ماه دیگر عامل انرژی است. نمود این انرژی بیشتر در جزر و مد دیده می شود. نوع سوم انرژی حاصل از زمین است که از منابع شیمیایی و هسته ای درون زمین تأمین می شود.

۱-۱-۱. انرژی خورشید

میزان تابش انرژی خورشید و تفاوت سالیانه

اشعه‌های خورشید مرتباً از اتمسفر زمین عبور کرده و به سطح آن می‌رسد. میزان تابشی که به صورت متوسط به مترمربع سطح زمین در محدوده اتمسفر در مدت زمانی که با خورشید مواجه می‌شود، می‌تابد میزان ثابتی است. با توجه به اینکه چرخش زمین به دور خورشید کاملاً به صورت دایره نیست، بلکه کمی بیضی است (فاصله زمین از خورشید در دی‌ماه ۱۴۷/۰۹ میلیون کیلومتر و در تیرماه ۱۵۲/۰۸ میلیون کیلومتر است)، سالیانه ۳ تا ۴ درصد تفاوت در میزان تابش اشعه خورشید در لبه‌های اتمسفر ایجاد می‌شود، اما به منظور ساده‌سازی در محاسبات بهتر است که میزان اشعه خورشید را ثابت فرض کنیم که معادل $\frac{W}{M^2}$ ۱۳۷۷ است.

اگر زمین کاملاً به صورت گرد فرض شود، مساحت آن با فرمول πr^2 محاسبه می‌شود (r میانگین شعاع زمین است)، میزان تابش اشعه خورشید معادل $1377\pi r^2$ خواهد بود. شعاع متوسط زمین برابر ۶,۳۲۴ میلیون متر بوده که نتیجه می‌گیریم:

$$\text{میزان اشعه خورشید} = 1377 \times \pi \times \left(\frac{6}{24 \times 10^6}\right)^2 = 1/72 \times 10^{-17} W = 1/72 \times 10^{-17} \text{ J/s}$$

اگر یک سال ۳۶۵/۲۵ روز فرض شود، میزان انرژی تابیده شده به سطح زمین در طول یک سال برابر با $5/46 \times 10^{-24}$ ژول خواهد بود.

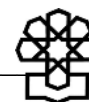
$$\begin{aligned} \text{انرژی تابیده شده در یک سال} &= 365/25 \times 24 \times 3600 \times 1/72 \times 10^{-17} \\ &= 5/46 \times 10^{-24} \text{ J} \end{aligned}$$

میزان انرژی تابشی بسیار بزرگ است. در سال ۲۰۱۱ میزان انرژی اولیه مصرفی در جهان برابر $5/98 \times 10^{-20}$ ژول بوده است.

تابش نور خورشید در سال ۲۰۱۱ حدود $\frac{5/46 \times 10^{-24}}{5/98 \times 10^{-20}}$ یا ۹۱۳۰ برابر مجموع انرژی اولیه مصرف شده جهانی در آن سال بوده است.

۱-۱-۲. انرژی درون زمین

انرژی که از درون زمین به سطح زمین می‌رسد معادل ۰/۰۶۳ وات بر مترمربع است که از منابع هسته‌ای، شیمیایی و گرمایی حاصل می‌شود. اگر زمین گرد فرض شود جریان انرژی برابر $0/063 \times \pi r^2$ وات خواهد بود. که از این میزان گرما برابر $3/2 \times 10^{17}$ وات از صخره‌ها و $2/2 \times 10^{11}$ وات از چشمه‌های آب گرم و آتشفشان‌ها منتقل می‌شود.



۳-۱-۱. انرژی جاذبه

انرژی به دست آمده از مکان‌ها و حرکت خورشید، زمین و ماه سبب جریان و موج اقیانوس‌ها می‌شود. این انرژی در حدود 3×10^{17} وات است که یک‌دهم انرژی آزاد شده درون زمین می‌باشد. مقایسه این سه منبع انرژی نشان می‌دهد که میزان انرژی خورشیدی ۵۰۰۰ برابر بیشتر از مجموع دیگر منابع انرژی پایه است. کاملاً روشن است که زمین از کمبود انرژی رنج نمی‌برد. انرژی طبیعی به‌وفور وجود دارد، اما مشکل زمانی پدید می‌آید که به مسئله توزیع، مکان، جمع، تبدیل و ذخیره انرژی در اشکال مختلف برمی‌خوریم. مهم‌تر از همه، مسئله مالکیت و به خدمت گرفتن این منابع از جانب انسان است، لذا به‌نظر می‌رسد که با مدیریت صحیح انرژی می‌توان به انرژی پایا برای همیشه و همه بشریت دست یافت.

۴-۱-۱. جریان انرژی در سطح زمین

۴۷ درصد از تابش نور خورشید، یعنی 1.7×10^{17} وات، توسط اتمسفر، اقیانوس‌ها و زمین جذب می‌شود. این مقدار از انرژی در دمای سطح به گرما تبدیل می‌شود و وارد چرخه هیدرولوژیکی زمین می‌شود. چرخه هیدرولوژیکی زمین شامل تبخیر، رسوب و ناپدید شدن سطحی آب است. همین که آب بخار می‌شود گرما را جذب می‌کند و وارد هوا و اتمسفر می‌شود. هنگام رسوب بخار، گرمای همراه آن به‌صورت گرمای دمای پایین آزاد می‌شود. مقداری از این انرژی در رودخانه‌ها، آبیگرها و حجم‌های یخ ذخیره می‌شود.

فتوسنتز گیاهان نیز فرآیندی است که انرژی تابشی خورشید را به‌وسیله کلروفیل برگ گیاهان جذب می‌کند. انرژی تابشی با دی‌اکسیدکربن و آب ترکیب می‌شود تا کربوهیدرات شیمیایی و اکسیژن تولید کند. وقتی که پوشش گیاهی از بین می‌رود انرژی ذخیره شده در برگ و گیاهان ناپدید می‌شود. تنها ۰/۰۲۳ درصد انرژی در فتوسنتز گیاهان وجود دارد. با این وجود، انرژی سالیانه فتوسنتز معادل 1.7×10^{17} ژول است که معادل انرژی مصرفی تجاری سال ۲۰۰۰ میلادی جهان است. فرآیند زوال گیاهان است که منجر به ایجاد منابع سوخت فسیلی می‌شود.

۵-۱-۱. جریان انرژی روی سطح زمین

حدود ۳۰ درصد از انرژی تابیده شده به زمین به‌صورت طول موج کوتاه با سرعت 1.7×10^{17} وات از زمین باز تابیده می‌شود. اما زمین باید تعادل انرژی را حفظ کند تا از بالا و پایین رفتن دما جلوگیری کند. به‌منظور حفظ این تعادل، کل انرژی تابیده شده باید با مجموع انرژی بازتاب شده و انرژی ذخیره شده یا تغییر شکل داده شده برابر باشد.

۶-۱-۱. انرژی ذخیره شده در سوخت فسیلی

همان‌طور که اشاره شد بخشی از انرژی خورشید در پوشش گیاهی ذخیره می‌شود. با دفن شدن این گیاهان در زیر خاک و صخره‌ها با گذشت میلیون‌ها سال منابع انرژی فسیلی ایجاد می‌شود. تغییرات زمین‌شناسی و آب و هوایی سبب تغییر در پوسته زمین می‌شود. فشارهای فیزیکی و تغییرات شیمیایی سبب به‌وجود آمدن سوخت‌های فسیلی - زغال سنگ، نفت و گازهای طبیعی - می‌شوند. این سوخت‌ها به همراه سوخت هسته‌ای و جریان طبیعی آب به‌عنوان سوخت‌های اولیه^۱ شناخته می‌شوند که معمولاً به اشکال دیگر انرژی تبدیل می‌شوند. در طول سالیان گذشته انسان برداشت زیادی از انرژی‌های فسیلی کرده است. به‌گونه‌ای که هم‌اکنون از میزان آنها به شکل قابل توجهی کاسته شده است.

در این بخش به منابع اصلی انرژی اشاره شد و همچنین در مورد اشکال مختلف بروز و ظهور آن مختصراً صحبت شد. در بخش بعد به بررسی انرژی الکتریسیته به‌عنوان ملموس‌ترین نوع انرژی برای بشر خواهیم پرداخت.

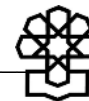
۲-۱. الکتریسیته

الکتریسیته متداول‌ترین نوع انرژی است که همواره مورد تقاضای بشر می‌باشد. الکتریسیته نامرئی و بی‌بو بوده و تنها با فشار دادن کلید در دسترس است، اندازه‌گیری آن آسان بوده و کاربردهای وسیع و مختلفی دارد. استفاده از این نوع انرژی روزبه‌روز رو به افزایش می‌باشد. وقتی الکتریسیته از برخی انواع سوخت فسیلی به‌وجود می‌آید، درواقع نوع دوم انرژی است. الکتریسیته به‌وجود آمده از منابع هسته‌ای و آبی درواقع نوع اول انرژی است.

۱-۲-۱. برخی ارتباطات اساسی الکتریکی

ولتاژ، جریان و نیرو

پتانسیل انرژی یک سیستم الکتریسیته به‌وسیله فشار الکتریکی یا ولتاژ به‌دست می‌آید. واحد اختلاف پتانسیل بین دو نقطه در یک مدار با (V) نمایش داده می‌شود. الکتریسیته مورد نیاز برای مصارف خانگی ۲۴۰ ولت در بریتانیا و ۲۲۰ ولت در ایران و ایالات متحده است. سلول‌های خورشیدی سیلیکونی ۰/۵ ولت، باتری‌های خشک کوچک ۱/۵ ولت و باتری اتومبیل معمولاً ۱۲ ولت است. برای انتقال الکتریسیته از روی زمین یا با کابل زیرزمینی ولتاژ معمولاً به چند هزار ولت (چند صد کیلووات) می‌رسد.



استفاده ولتاژ در مدار منجر به جریان الکتریسیته برحسب آمپر می‌شود. مقادیر کمتر جریان به صورت میکروآمپر یا میلی‌آمپر نمایش داده می‌شوند. مصارف خانگی مانند ماشین لباسشویی بین ۳ تا ۵ آمپر انرژی مصرف می‌کند. ماشین‌های صنعتی بزرگ معمولاً ده‌ها و یا صدها آمپر انرژی مصرف می‌کنند. یک رعد و برق در واقع تخلیه الکتریکی است که معادل میلیون‌ها آمپر در چند ثانیه اتفاق می‌افتد.

جریان الکتریکی در مدار با مخالفت مدار روبرو می‌شود. این مقاومت (R) که برحسب اهم اندازه‌گیری می‌شود مانع حرکت جریان در مدار می‌شود.

۲-۱. تولید الکتریسیته

یک ژنراتور الکتریکی دستگاهی برای تبدیل انرژی مکانیکی به انرژی الکتریکی است. وقتی گاز طبیعی، نفت، زغال‌سنگ و سوخت‌های هسته‌ای استفاده می‌شوند سوخت ابتدا تبدیل به انرژی گرمایی شده و سپس توسط توربین به انرژی مکانیکی تبدیل می‌شود.

ژنراتورهای الکتریکی بر مبنای اصول رساناهای الکترومغناطیسی که توسط دانشمند انگلیسی مایکل فارادی در اوایل قرن نوزدهم ابداع شد کار می‌کند. وجود سیم‌پیچ در قسمت چرخشی سبب می‌شود قسمت مغناطیسی با سرعت بالا بچرخد. همین امر سبب انتقال ولتاژ به کندانکتور می‌شود. بسامد و بزرگی ولتاژ به سرعت چرخش بستگی دارد.

۳-۲-۱. مکان نیروگاه الکتریکی

انتخاب دقیق مکان نیروگاه الکتریکی شامل نکات تکنیکی و غیرتکنیکی زیر است:

۱. تأمین سوخت،
۲. تأمین آب،
۳. تهیه زمین،
۴. دسترسی به جاده و ریل،
۵. بلندای ساختار،
۶. دفع ضایعات،
۷. از لحاظ نزدیکی به مناطق پرجمعیت،
۸. مسائل زیست‌محیطی،
۹. درجه حرارت محیط،
۱۰. رطوبت هوا.

۱-۲-۳-۱. تأمین سوخت

نیروگاه باید نزدیک به منابع اقتصادی تأمین سوخت باشد. در نیروگاه‌های زغال‌سنگ دسترسی به ریل بسیار مهم است. در نیروگاه‌های نفتی دسترسی به لوله‌های نفت بسیار مهم است، اما در نیروگاه‌های هسته‌ای مسافت مهم نیست.

۱-۲-۳-۲. تأمین آب

باید دسترسی کافی به منابع آب سرد برای خنک کردن بخار متراکم نیروگاه‌های الکتریکی گرمایی وجود داشته باشد. یک نیروگاه ۲۰۰۰ واتی ۶۰ مترمکعب آب در ثانیه برای خنک شدن نیاز دارد. انتقال آب کافی از مسافت طولانی بسیار گران خواهد بود. بنابراین نیروگاه‌های گرمایی غالباً کنار ساحل دریا یا در طول رودخانه‌ها ساخته می‌شوند. زمانی که منابع آبی کافی نیست باید از برج‌های خنک‌کننده استفاده کرد. ساختار این برج‌ها عموماً فولادی و بتنی بوده و بسیار بزرگ است که بخار آن از کیلومترها دورتر قابل رؤیت است.

۱-۲-۳-۳. تهیه زمین

یک نیروگاه به‌صورت میانگین نیازمند زمینی بالغ بر ۱۲۰ تا ۳۷۰ هکتار است. زمین باید بالاتر از سطح جریان آب باشد اما نه آنقدر بالا که پمپاژ کردن آب بسیار گران تمام شود. تجهیزات ساختمان نیروگاه بسیار سنگین‌اند بنابراین نیازمند ساختار صخره‌مانند در پی آن است.

۱-۲-۳-۴. دسترسی به جاده و ریل

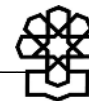
ساخت نیروگاه ممکن است منجر به ترافیک بالا شود که نیازمند دسترسی به شبکه جاده‌ای است. برای نیروگاه‌های زغال‌سنگ دسترسی به شبکه حمل‌ونقل ریلی ضروری است.

۱-۲-۳-۵. بلندای ساختار

برج‌های خنک‌کننده ساختارهای بلندی هستند که گاهی اوقات به بیشتر از ۱۰۰ متر می‌رسد تا دود و بخار را دفع کند. بلندای ساختار باید با قوانین زیست‌محیطی سازگار بوده و اگر نزدیک فرودگاه است با قوانین فرودگاه همخوانی داشته باشد.

۱-۲-۳-۶. دفع ضایعات

برای نیروگاه‌های زغال‌سنگ ضروری است که نیروگاه مجهز به سیستم دفع خاکستر و فضولات باشد. دفع فضولات نیروگاه‌های هسته‌ای نیز جزء مواردی است که هنوز بشر راه‌حل مناسبی برای آن نیافته است.



۷-۳-۱. نزدیکی به مناطق پرجمعیت

در بریتانیا ساخت نیروگاه هسته‌ای به دور از مناطق مسکونی طبق قانون امری ضروری است. یک مکان دور برای ساخت نیروگاه با سوخت فسیلی در جایی مثل بریتانیا که کشوری دارای تراکم جمعیتی بالا می‌باشد غیرممکن است.

۸-۳-۱. مسائل زیست‌محیطی

تولید الکتریسیته دلیل یک‌سوم آزاد کردن دی‌اکسیدکربن در اروپای غربی و آمریکای شمالی است. دی‌اکسیدکربن دلیل اصلی گرم شدن زمین به دلیل فعالیت‌های انسانی است. از میانه قرن نوزدهم تاکنون بیش از ۱۱۰۰ گیگاتن دی‌اکسیدکربن توسط بشر تولید شده است. دی‌اکسیدکربن تأثیرات جبران‌ناپذیری بر محیط زیست و اکوسیستم جهان داشته است.

۳-۱. انرژی هسته‌ای

در سال ۱۹۵۷ اولین ایستگاه انرژی هسته‌ای تجاری تولید الکتریسیته در شیپینگپورت پنسیلوانیا در آمریکا آغاز به کار کرد. پیشرفت این تکنولوژی به‌طور چشمگیری سریع بود. تنها ۱۹ سال بین اولین نمایش علمی فیزیک و به مرحله تجاری رساندن نسل جدید تکنولوژی زمان لازم بود. این دوره از زمان به‌طور شگفت‌آوری کوتاه بود که بیانگر اشتیاق انسان به بهره‌برداری از این منبع انرژی است.

بعد از شیپینگپورت^۱ نیز پیشرفت به همان منوال سریع بود. تعداد زیادی رآکتور در بسیاری نقاط در سرتاسر جهان ساخته شد تا آنجا که تا سال ۲۰۰۰ میلادی در حدود ۴۴۲ رآکتور در ۳۱ کشور وجود داشت که ۱۰ درصد از الکتریسیته مورد نیاز جهان را تأمین می‌کرد. البته پس از آن روند اقبال به این انرژی کاهش یافت.

۱-۳-۱. نگرانی‌های زیست‌محیطی

مشکلات زیست‌محیطی که با انرژی هسته‌ای در ارتباط هستند شامل تولید مقادیر زیادی مواد اضافی به دلیل استخراج منابع معدنی اورانیم می‌شود؛ آزاد شدن گاز رادون رادیواکتیو از معادن، تولید مواد رادیواکتیو از فرآیند غنی‌سازی و نشت گازهای رادیواکتیو (کریپتون و زنون) و تریتم^۲ از این قبیل هستند. مهمترین نگرانی‌های مربوط به این حوزه حوادث بزرگ هسته‌ای بوده است. مضاف بر آن دانشمندان نگران میله‌های سوخت مصرف شده یا همان پسماندهای هسته‌ای هستند که با آنها چه باید کرد؟ تنها راهحل برای مورد دوم این است که یا دوباره آن را وارد فرآیند

1. Shippingport

2. Tritium

استفاده کنند (که البته یک روش پرهزینه و دشوار است) یا اینکه برای مدت مدیدی آن را ذخیره کنند. اینکه این مدت مدید چقدر است را می‌توان از نیم عمر^۱ عناصر تشکیل‌دهنده آن به‌دست آورد، که گاهی ممکن است به هزاران سال برسد. این زمان آنچنان طولانی است که روشن نیست در صورتی که جنگ یا بلایای طبیعی در این دوران رخ دهد چگونه باید با مشکلات ناشی از آزادسازی این مواد روبرو شد. به همین دلیل، از آنجایی که این منبع انرژی سبب مشکلات زیست‌محیطی، اقتصادی و تکنیکی برای نسل بعد می‌شود، بسیاری بر این باورند که انرژی هسته‌ای با تعریف پایداری در تضاد است. طی چند سال گذشته چندین حادثه هسته‌ای منجر به خسارات جبران‌ناپذیری شده است. یکی از این حوادث جدی برمی‌گردد به جزیره تری مایل^۲ در پنسیلوانیای آمریکا که رآکتور به‌دلیل از دست دادن خنک‌کننده در سال ۱۹۷۹ توسط گرمای پسماند هسته از بین رفت. اگرچه رآکتور خاموش شده بود، اما چکه‌های کوچکی از مواد رادیواکتیو از ایستگاه‌های انرژی و دیگر تأسیسات جانبی منتشر شد.

در سال ۱۹۸۶ یک رآکتور در ایستگاه چرنوبیل در اوکراین به‌دلیل یک انفجار از بین رفت. قسمت عمده‌ای از مواد رادیواکتیو آزاد و در سرتاسر اروپا منتشر شد. اگر نگوئیم صدها هزار نفر، ده‌ها هزار نفر به‌دلیل این اتفاق بی‌خانمان شدند و خاک و حیوانات نیز آلوده شدند. تعداد زیادی از کارگران و پرسنل سایت هسته‌ای مقدار زیادی از این رادیواکتیو مرگبار را دریافت کرده و تخمین زده شد که بالغ بر ۴۷۰۰۰ نفر در طول ۵۰ سال جان خود را به‌دلیل آزاد شدن این مقدار از ایزوتوپ از دست می‌دهند.

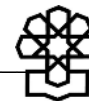
آخرین مورد نیز نشت رادیواکتیو به‌واسطه سونامی از نیروگاه فوکوشیمای ژاپن بود که تبعات سنگینی را برای این کشور ایجاد کرد.

۲-۳-۱. فضولات

بسیاری از فضولات و آلودگی‌های به‌وجود آمده از تولید، توزیع و استفاده انرژی مدت کمی به بقای خود ادامه می‌دهند. برخی از آلودگی‌ها مدت بیشتری را در اتمسفر، زمین یا اکوسیستم باقی می‌مانند که از این قبیل عبارتند از: نخیلر هیدروالکتریک، گازهای گلخانه‌ای و فضولات هسته‌ای. با توجه به این نکته که برخی از فضولات هسته‌ای به‌صورت رادیواکتیو باقیمانده و هزاران سال برای محیط زیست خطرناک‌اند، این محصولات به‌طور حتم تعریف ما را از تداوم‌پذیری بر هم می‌زند، به‌طوری که این فضولات مشکلات جدی برای نسل آینده به‌وجود خواهند آورد. یک فرق اصلی بین

1. Half Life

2. Three Miles Island



فضولات هسته‌ای و دیگر انواع آلودگی‌ها وجود دارد و آن این است که این نوع آلودگی‌ها آنچنان خطری برای نسل آینده محسوب نمی‌شوند. به هر حال، مسئله این است که نگه داشتن هر چیزی به مدت ۱۰۰۰ سال آن هم در برابر سیل، زلزله، جنگ و خطرات دیگر کار آسانی نیست.

فضولات از چرخه‌های مختلف انرژی هسته‌ای حاصل می‌شود و شامل: تکه‌هایی که از استخراج اورانیم به دست می‌آیند، محصولاتی که از فرآیند غنی‌سازی حاصل می‌شود، سوخت صرف شد (حتی اگر دوباره پردازش شوند تا اورانیم و پلوتونیم مفید را جدا کنند باز هم پسماند رادیواکتیو بجا می‌گذارد)، فضولات نیروگاهی بجا مانده مانند فضولات مایع و فلزات به دست آمده از سوخت و در نهایت خود رآکتور که باید در پایان استفاده مفید خود از چرخه خارج شود.

انتظار می‌رود که رآکتورهای دارای شکافت هسته‌ای حتی سال‌ها پس از آنکه دیگر انرژی تولید نمی‌کنند تا سطح رادیواکتیو آن به سطحی برسد که قابل مدیریت باشد امکان از بین بردن پیدا نکنند. از رده خارج کردن این رآکتورها باید در چند مرحله صورت پذیرد: خارج کردن سوخت (تقریباً سه سال)، خارج کردن مواد غیررادیواکتیو و نیروگاه (تقریباً پنج تا ده سال)، جدا کردن رآکتور و بازگرداندن سایت به شرایط امن (تقریباً صد سال پس از خاموش کردن). از آنجا که رآکتورهای کمی تاکنون از چرخه خارج شده‌اند و مراحل بلندمدت تاکنون کامل نشده‌اند، بنابراین نمی‌توان تخمین زد که این فرآیند چه مقدار به هزینه انرژی هسته‌ای می‌افزاید.

۴-۱. زغال سنگ

۴-۱-۱. ترکیب و جایگاه زغال سنگ

زغال سنگ درواقع یک ماده سخت قابل اشتعال و پایدار است. با وجود اینکه سال‌های سال مورد استفاده بوده است، ترکیب شیمیایی آن هنوز هم کاملاً مشخص نیست. ماده بسیار پیچیده و متفاوتی است که کیفیت آن توسط دو دسته از مواد تشکیل‌دهنده آن قابل بررسی است: الف) بقایای ارگانیک گیاهان که توسط ترکیب گرما و فشار به حالت جامد تبدیل شده‌اند. ب) مواد غیرارگانیک که به وسیله گیاهان، آب و مواد معدنی زمین‌شناسی به وجود آمده‌اند. مواد ارگانیک غالباً شامل کربن و مقدار اندکی نیتروژن، هیدروژن و اکسیژن است. مواد غیرارگانیک و معدنی که تقریباً ۹ تا ۳۰ درصد وزن زغال سنگ را دارا می‌باشد شامل سولفور و مقدار کم اما سمی آرسنیک، بریلیوم، کادمیوم، جیوه، سرب، سلنیوم و روی است.

زمانی که زغال سنگ گرم می‌شود مواد زیادی به وجود می‌آیند که برخی از آنها مفید و برخی از آنها خطرناک‌اند. همین که هیدروژن و اکسیژن تجزیه می‌شوند گازهایی همچون دی‌اکسید کربن،

مونوکسیدکربن، متان و بخار آب شکل می‌گیرند. بقایای قابل اشتعال باقی مانده بعد از اینکه زغال‌سنگ می‌سوزد کربن خالص^۱ است.

در طول شکل‌گیری زغال‌سنگ، از آنجا که مواد دستخوش تغییرات اساسی از پوشش گیاهی به زغال‌سنگ می‌شوند، مراحل مختلف زغال‌سنگ‌سازی^۲ را طی می‌کنند. برای دسته‌بندی زغال‌سنگ شیوه‌های متفاوتی وجود دارد. عموماً به دو عامل اصلی ارزش گرمایی زغال‌سنگ و نسبت کربن - هیدروژن برای طبقه‌بندی این ماده دقت می‌شود. جدول ۱-۱ طبقه‌بندی زغال‌سنگ را از آنتراسیت^۳ با ناپایداری پایین و کربن بالا تا لیگنایت^۴ نشان می‌دهد. آنتراسیت آرام‌سوزترین و تمیزترین زغال‌سنگ است. زغال‌سنگ قیری با ناپایداری پایین در مقایسه با آنتراسیت خاکستر کمتری تولید می‌کند.

جدول ۱-۱. طبقه‌بندی انواع زغال‌سنگ

طَبَقَه	درصد کربن	درصد هیدروژن	درصد کربن ثابت*	ارزش گرمایی $Mjkg^{-1}$
Anthracite	۹۵-۹۸	۲/۹-۳/۸	۹۱-۹۵	$>32/5$
Low Volatile Bituminous	۹۱-۹۲	۴/۲-۴/۶	۸۰-۸۵	$>32/5$
Medium Volatile Bituminous	۸۷-۹۲	۴/۶-۵/۲	۷۰-۸۰	$>32/5$
High Volatile Bituminous	۸۲/۵-۸۷	۵/۰-۵/۶	۶۰-۷۰	$32/5-26/7$
Sub-bituminous	۷۸-۸۲/۵	۵/۲-۵/۶	۵۵-۶۰	$26/7-19/3$
Lignites	۷۳-۷۸	۵/۲-۵/۶	۵۰-۵۵	$<19/3$

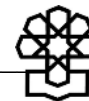
Source: "Energy Studies", Second Edition, W. Shepherd, Imperil College Press, London, 2005.

* Fixed Carbon %

۲-۴-۱. استخراج زغال‌سنگ

زغال‌سنگ به دو روش اکتشاف عمیق و اکتشاف سطحی از زمین استخراج می‌شود. در اکتشاف عمیق به صورت عمودی به معدن نفوذ کرده و سپس به صورت افقی شروع به برداشت می‌شود. عمق معدن به وسیله ساختار دنده بادی قابل دستیابی است. محافظت از سقف معدن زمان اکتشاف برای جلوگیری از ریزش بسیار مهم است. زغال‌سنگ و صخره‌های استخراج شده توسط یک تسمه

1. Fixed Carbon
2. Coalification
3. Anthracite
4. Lignite



حمل‌کننده به ورودی معدن و از آنجا به سطح زمین انتقال داده می‌شوند. حدود ۵۰ تا ۶۰ درصد محتویات در استخراج عمیق امکان استخراج دارد.

کار کردن در معادن عمیق نه تنها یک شغل غیربهداشتی و با آلودگی زیاد است، بلکه بسیار مشکل و خطرناک است. اکتشاف معدن عمیق سبب آزاد شدن گازهای خطرناکی همچون مونوکسید کربن و متان می‌شود که خطر انفجار و آتش‌سوزی را بالا می‌برد. میزان مرگ‌ومیر و حوادث جدی در صنعت زغال‌سنگ جزء بدترین‌هاست. در ایالات متحده آمریکا تعداد حوادث معدن در چرخه تولید انرژی حدود ۱۰ برابر بیشتر از نیروگاه‌های هسته‌ای، گازی و نفتی است. انفجار گاز متان در معدن میل فیلد اوهایوی جنوبی در آمریکا در سال ۱۹۳۰، ۸۲ نفر را شامل ۷۳ معدنچی، ۵ کارمند و ۴ تماشاچی به کام مرگ فرو برد.

تا دوره جنگ جهانی دوم هرساله حدود ۵۰ حادثه مرگبار در بریتانیا اتفاق می‌افتاد. در برخی از مواقع، آتش‌سوزی و انفجار سبب مرگ عده‌ای از افراد می‌شد. صنعت زغال‌سنگ در بریتانیا در سال ۱۹۴۷ از حالت خصوصی خارج و عمومی شد و از آن پس بود که ضریب ایمنی بالا رفت. شرایط کاری نیز با بهبود مکانیزاسیون و بهبود تهویه هوای زیرزمینی بهبود یافت.

اگر درزهای معدن زغال‌سنگ حدود ۲۰۰ فوت باشند می‌توان به وسیله استخراج معدن سطحی آن را استخراج کرد. استخراج زغال‌سنگ از معادن سطحی بسیار مقرون به صرفه‌تر از معادن عمیق است. استخراج معدن سطحی بازده بیشتری از استخراج معدن عمیق دارد که در آن تا ۹۰ درصد محتویات معدن ممکن است استخراج شود. در روسیه و کشورهای مشترک‌المنافع، ایالات متحده و استرالیا استخراج سطحی بسیار متداول‌تر از استخراج عمیق است.

۳-۴-۱. حمل زغال‌سنگ

۱-۳-۴-۱. حمل و نقل سطحی

رایج‌ترین روش برای حمل زغال‌سنگ در اروپا و آمریکای شمالی ریل است. رودخانه‌های بزرگ آمریکا به عنوان راه آبی برای انتقال زغال‌سنگ به صداها و یا هزارها کیلومتر دورتر مورد استفاده قرار می‌گیرند و حمل و نقل حدود ۲۰ درصد زغال‌سنگ ایالات متحده به این روش انجام می‌شود. در اروپا بیشتر از نیمی از زغال‌سنگ به این روش حمل می‌شود. حمل و نقل آبی ارزان‌تر از حمل و نقل ریلی بوده اما به دلیل جغرافیای راه آبی و اندازه رودخانه‌ها محدود است. حمل زغال‌سنگ به وسیله جاده بسیار گران‌تر از ریل است.

در بریتانیا حمل زغال‌سنگ یک فرآیند انرژی‌بر است. حمل زغال‌سنگ بزرگ‌ترین چالش سیستم ریلی است و بیشترین درآمد مالیاتی را دارد.

۲-۳-۴-۱. حمل لوله‌ای

یکی از روش‌های حمل زغال‌سنگ حمل با لوله است. در این روش زغال‌سنگ را با مقدار مشابهی آب ترکیب کرده و به وسیله لوله عمل انتقال صورت گیرد. می‌توان آن را با لوله به جایگاه مورد استفاده انتقال داد. در محل استفاده اجزای ترکیب شده زغال‌سنگ را به وسیله سانتریفیوژ از یکدیگر جدا کرده و آن را برای جوشاننده‌های بزرگ آماده می‌کنند. عملکرد این لوله‌ها بستگی به مقدار آب مورد نیاز دارد. در مقایسه با حمل و نقل ریلی، استفاده از این لوله‌ها مزایای زیادی دارد. لوله‌های با مسافت طولانی در ایالات متحده سالیانه بالغ بر ۵ میلیون تن زغال‌سنگ توسط ۲۷۳ مایل خط لوله از آریزونا به نوادا جابجا می‌شود. این معادل حمل ریلی حدود ۱۵۰ لوکوموتیو در روز است.

۴-۴-۱. آثار زیست‌محیطی زغال‌سنگ

تا دهه ۱۹۵۰ زغال‌سنگ به عنوان اولین سوخت داخلی و صنعتی در بریتانیا مورد استفاده قرار می‌گرفت و بیشتر اوقات در خانه‌ها و کارخانه‌ها سوزانده می‌شد. دود و مواد آزاد شده از این آتش مستقیماً در اتمسفر محل سکونت پخش می‌شد. برخی از صنایع مانند صنعت تولید برق به نوعی این مواد آزاد شده را تصفیه می‌کردند اما به هر حال نتیجه سوزاندن این سوخت‌ها آلودگی هوا بود. در شهرهای صنعتی این مسئله به صورت آلودگی و سیاهی دیوارها خود را نشان می‌داد. در سال ۱۹۵۴ مه غلیظ لندن در واقع ترکیبی از مه طبیعی و دود حاصل از فعالیت‌های انسانی بود که به آن دود مه^۱ می‌گفتند. این مسئله روزها به طول می‌انجامید و باعث توقف حمل و نقل می‌شد و گفته می‌شود که دلیل بسیاری از مرگ و میرها در آن سال‌ها بوده است.

سه آلاینده اصلی کارخانه‌های سوخت زغال‌سنگ دی‌اکسید سولفور، دی‌اکسید نیتروژن که باران اسیدی تولید می‌کند و ریزه‌ها هستند.

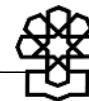
۱-۴-۴-۱. اسید سولفور

محصولات سولفور جزء آلاینده‌های اصلی هستند که از سوختن زغال‌سنگ آزاد می‌شوند. سولفور معدنی به صورت فیزیکی جدا، اما متصل به زغال‌سنگ است و می‌توان به وسیله شستشو قبل از سوزاندن آن را جدا کرد. سولفور ارگانیک به صورت شیمیایی با زغال‌سنگ ترکیب شده و قابلیت جدا شدن را ندارد.

۲-۴-۴-۱. اکسید نیتروژن

در حین سوختن زغال‌سنگ، نیتروژن هم از زغال‌سنگ و هم از هوایی که زغال‌سنگ در آن می‌سوزد آزاد می‌شود. تشکیل اکسید نیتروژن بستگی به دلایل مختلفی از جمله درجه حرارت شعله،

1. Smog



زمان سوختن، وجود هوای اضافی و میزان خنک شدن آن دارد. برای کاهش آزادسازی اکسید نیتروژن باید فرآیند سوختن را اصلاح کرد. اگر درجه حرارت سوختن پایین باشد، هوا کم باشد، چرخش گازها و تزریق آب به جعبه آتش محدود باشد میزان اکسید نیتروژن بیشتری آزاد خواهد شد. در بریتانیا وسایل موتوری که اکسید نیتروژن آزاد می‌کنند بسیار شایع‌تر از گازهای آزاد شده از نیروگاه‌هاست. به همین دلیل است که امروزه در بریتانیا تمام خودروها باید به فیلتر گاز اگزوز مجهز باشند. در ایالات متحده در سال ۱۹۹۹ بیش از نیمی از اکسید نیتروژن به‌دلیل استفاده از کودهای کشاورزی آزاد شد. باران اسیدی به‌دلیل ترکیب دی اکسید سولفور و اکسید نیتروژن با بخار آب در اتمسفر ایجاد می‌شود.

۳-۴-۱. ریزه‌ها

گازهای آزاد شده از سوخت زغال‌سنگ حاوی ریزه‌های جامد، غالباً کربن، است. محدوده اندازه آن معمولاً یک میلیمتر است که ممکن است به‌وسیله استنشاق وارد بدن انسان شود. این ریزه‌ها ممکن است به همراه گازهای آزاد شده صدها مایل از محل تولید خود دور شوند. ماهیت شیمیایی این ریزه‌ها در طول این حرکت تغییر می‌کند. از میزان سمی بودن آن هم کاسته شده و هم ممکن است زیاد شود.

۴-۴-۱. کربن

سوختن زغال‌سنگ سبب آزاد شدن گاز دی‌اکسیدکربن می‌شود و همین امر سبب گرم شدن جهان به‌دلیل تجمع گازهای گلخانه‌ای می‌شود.

۵-۱. نفت

۱-۵-۱. تاریخ و پیشرفت صنعت نفت

نفت و فرآورده‌های آن در تمدن‌های اولیه مانند مصر (۳۰۰۰ تا ۲۰۰۰ سال قبل از میلاد مسیح) و مزوپوتامیا (عراق کنونی) مورد استفاده بوده است. این نفت معمولاً از سطح دریاها به‌دست می‌آمد. به‌صورت آسفالت برای قیرگونی قایق‌ها، جا دادن جواهرات در قالبشان، نگهداری مومیایی‌ها، ساختن ساختمان‌ها و ضدآب‌ها مورد استفاده قرار می‌گرفته است.

در اوایل قرن هفتم عرب‌ها نوعی نور را که به‌وسیله نفت تولید می‌کردند به‌عنوان ابزاری برای جنگ مورد استفاده قرار می‌دادند. در مودنای ایتالیا در قرن هجدهم از نفت برای روشنایی خیابان‌ها استفاده می‌شد و در اسکاتلند از آن به‌عنوان پارافین استفاده می‌کردند.

در سال ۱۸۵۹ در پنسیلوانیای آمریکا اولین چاه نفتی موسوم به چاه ادوین دریک که ۲۰ متر عمق داشت از طریق روش‌های مدرن حفر و نفت از آن استخراج شد. در قرن نوزدهم قطب اصلی

اکتشاف نفت در آمریکا جان راکفلر صاحب شرکت استاندارد اوایل بود که ثروتمندترین مرد در جهان شد. در سال ۱۹۱۱ این شرکت با وضع قانون عدم اطمینان در آمریکا به شرکت‌های کوچک‌تری تبدیل شد. تا جنگ جهانی دوم (۱۹۴۵-۱۹۳۹) صنعت بین‌المللی نفت به دلیل وفور منابع طبیعی و نیروی کار متخصص در اختیار آمریکا بود. در دهه‌های ۱۹۲۰ و ۱۹۳۰ بزرگ‌ترین میدان نفتی خاورمیانه در عربستان سعودی توسط مهندسين اروپایی و آمریکایی کشف و توسعه یافت.

۲-۵-۱. هفت خواهران نفتی^۱

تا سال ۱۹۷۳ تولید و قیمتگذاری نفت توسط ۶ شرکت بزرگ بین‌المللی موسوم به هفت خواهران انجام می‌شد. با توجه به میزان دارایی از ابتدا تا هفتمین آنها عبارتند از: اکسون (آمریکا)، رویال داچ/شل (هلند/بریتانیا)، تکساکو (آمریکا)، گلف اویل (آمریکا)، موبیل (آمریکا)، بریتیش پترولیوم (بریتانیا)، سوکال (آمریکا). در بریتانیا شرکت اکسون با نام اسو فعالیت می‌کرد. در سال ۱۹۹۹ ادغام شرکت بریتیش پترولیوم و امریکن اویل کامپنی باعث شد تا این شرکت نو تأسیس جایگاه سوم را بین هفت شرکت به خود اختصاص دهد. اکسون و موبیل نیز اخیراً نیروهای خود را ادغام کردند تا بزرگ‌ترین شرکت به حساب بیایند.

سود مالی زیادی که شرکت‌های هفت خواهران از خاورمیانه کسب کردند آنها را به سمت بازار خاورمیانه در دهه ۱۹۵۰ سوق داد. شرکت‌هایی همچون آموکو، سوهیو، کونوکو و آرکو نیز از لحاظ قدرت و ثروت بسیار بزرگ شدند. دو کشف بزرگ در دهه‌های ۱۹۶۰ و ۱۹۷۰ خارج از خاورمیانه اتفاق افتاد. در سال ۱۹۵۹ تیم اکسون - شل موفق شدند تا میدان نفتی جدیدی موسوم به گرانیگن کشف کنند. در سال ۱۹۶۵ شرکت بریتیش پترولیوم گاز طبیعی را در سواحل انگلستان و سپس نفت را در شمال دریای شمالی کشف کرد. در ضمن، در سال ۱۹۶۸، شرکت آرکو نفت را در خلیج پروندهوی آلاسکا کشف کرد. شرکت بریتیش پترولیوم ۹ ماه بعد نفت را در آلاسکا استخراج کرد. میدان نفتی آلاسکا بزرگ‌ترین میدان نفتی تگزاس غربی بود.

۳-۵-۱. میدان نفتی اروپا

در سال ۱۹۷۰ شرکت بریتیش پترولیوم (بی پی) میدان نفتی بزرگ فورتیز را در زیر دریای شمالی در شمال آبردین واقع در اسکاتلند کشف کرد. یک سال بعد، در سال ۱۹۷۱، شرکت شل/اکسون میدان نفتی بزرگ جزیره شتلند شمال اسکاتلند را کشف کرد. در دهه‌های ۱۹۷۰ و ۱۹۸۰ تعدادی میادین نفتی بزرگ و متوسط در دریای شمالی کشف شد. بریتانیا که همواره در طول تاریخ یک مصرف‌کننده بزرگ بود، می‌رفت تا به یک تولیدکننده بزرگ نفت بدل شود. در ابتدا دولت بریتانیا



اراده و تخصص لازم برای تولید نفت را دارا نبود. قسمت اعظمی از منابع برای استخراج در دست شرکت‌های آمریکایی بود. در سال ۱۹۷۳ بی پی کنترل استخراج حدود ۲۰ درصد و شل ۱۵ درصد از منابع نفتی را در اختیار گرفتند اما هنوز هم قسمت اعظم تولید نفت در دست شرکت‌های هفت خواهران آمریکایی بود. تا هفت سال بعد از اولین اکتشاف بود که مجلس بریتانیا متوجه میزان درآمدهای نفتی این شرکت‌ها شد. گزارش دولت در سال ۱۹۷۳ انتقاد تندی به خدمات شهروندی بریتانیا بود که در آن بریتانیا می‌بایست سهم کمتری از درآمدهای نفتی را در مقایسه با دیگر کشورها داشته باشد. از سال ۱۹۱۴ تا سال ۱۹۸۷ دولت بریتانیا سهام‌دار اصلی بی پی بود. به‌عنوان مثال در سال ۱۹۷۴، ۴۸ درصد از سهام بی پی در اختیار دولت بود اگرچه بی پی هرگز توسط دولت به مالکیت تام گرفته نشد. این سهم در سال ۱۹۸۷ فروخته شد و تنها ۱/۸ درصد از آن باقی ماند. میزان باقی مانده در دسامبر سال ۱۹۹۵ با ۵۰۰ میلیون یورو واگذار شد.

۴-۵-۱. اوپک

در سال ۱۹۶۰ سازمانی توسط تولیدکنندگان اصلی نفت (بجز آمریکا) شکل گرفت تا در مقابل تأثیر شرکت موسوم به هفت خواهر بایستد. این مجموعه سازمان کشورهای صادرکننده نفت (اوپک) نام گرفت. در سال ۱۹۷۳ بعد از کشمکش‌های فراوان توسط تولیدکنندگان نفت اوپک و شرکت‌های نفتی غرب، اوپک به‌صورت یک‌جانبه عمل کرده و قیمت نفت را افزایش داد. نتیجه آن شکاف عمیق در صنعت نفت آمریکای شمالی و اروپای غربی بود. چهار برابر شدن قیمت نفت در طول یک سال منجر به چیزی شد که سیاستمداران به‌عنوان «بحران نفت»^۱ توصیف کردند. در نتیجه کنترل قیمت نفت از دست اربابان تاریخی خارج و به‌دست تولیدکنندگان افتاد. قیمت و میزان تولید نفت هم‌اکنون توسط مذاکره بین اعضای اوپک و تولیدکنندگان مشخص می‌شود اما با دولت‌های کشورهای مربوط نیز در این رابطه مشورت می‌شود. تعدادی از تولیدکنندگان اصلی (همچون روسیه، ایالات متحده، بریتانیا و نروژ) عضو اوپک نیستند.

۵-۵-۱. مسائل زیست‌محیطی

علاوه‌بر مسائل مربوط به تولید گازهای گلخانه‌ای، خطرات زیست‌محیطی اکتشاف، استخراج و حمل نفت موجب خسارات به حیات وحش و اختلال در مهاجرت حیوانات می‌شود. استخراج نفت نیز آلودگی‌های زیادی ناشی از دفع گل حفاری ایجاد می‌کند. ترمیم زمین پس از لوله‌گذاری و اکتشاف نیز بخش دیگری از این خسارات زیست‌محیطی است.

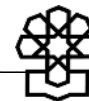
خطرات دیگری نیز در مورد سکوه‌های نفتی وجود دارد. یک سکوی معمول درواقع کارخانه تولید نفت است که روی سطح دریا بر روی پایه‌های هیدرولیکی سوار است. کارکنان برای هفته‌ها روی عرشه آن زندگی می‌کنند و آب و غذا و وسایل ضروری مورد نیاز به وسیله قایق یا هلیکوپتر برای آنها فراهم می‌شود. نفت خام به وسیله لوله‌های موجود در درون منابع موجود در دریا به سطح آن پمپاژ می‌شوند. در برخی از مکان‌ها نفت خام به درون تانکرها پمپاژ می‌شود تا به پالایشگاه‌ها در سرتاسر جهان توزیع شود. حدود یک‌چهارم تولید نفت جهان از منابع موجود در ریاست. این منابع نفتی دریا مشکلات زیست‌محیطی را به دنبال دارد همچون: آلودگی بستر دریا، اختلال در مسیر مهاجرت ماکیان، آسیب به گروه‌های ماکیان و آلودگی ساحل به دلیل نشت نفت.

این سازه‌ها همانند هر ساختار صنعتی دیگری امکان انفجار دارند. بزرگ‌ترین خطر زیست‌محیطی صنعت نفت نشت نفت از تانکرهاست. در ۱۹۹۴ تعداد کل نفتکش‌های جهان ۳۱۹۴ بود. شرکت اکسون/ موبیل بیش از ۵۰۰ تانکر و سوپر تانکر در سال ۱۹۹۹ در اختیار داشت. در بریتانیا نفت سبب آلودگی بسیاری از سواحل و نابودی حیات وحش شدند. بزرگ‌ترین فاجعه نفتکش مربوط می‌شود به نفتکش «الدون والدن» در پرینس ویلیام ساند آلاسکا در سال ۱۹۸۷. نفتکش به صخره برخورد کرد و مخزن‌های حاوی نفت خام آن سوراخ شد. نفت زیادی نشت کرد و هزینه نفت‌زدایی از دریا بسیار گران تمام شد. امروزه تکنیک‌های جدیدی برای این امر وجود دارد. تأثیرات آلودگی نفت روی حیات دریایی غیرقابل جبران است. بدترین ویژگی این نوع آلودگی این است که نتایج بلندمدت آن نامشخص است. لکه‌های نفت در سطح آب باقی مانده و به وسیله امواج در سرتاسر جهان پخش می‌شود.

تولید نفت چه در دریا و چه در خشکی با انتشار گاز سبب آلودگی محیط زیست می‌شود. بخش عظیمی از گازهای گلخانه‌ای تولیدی امروز ناشی از سوختن نفت یا مشتقات مربوط به آن است.

۶-۱. گاز طبیعی

گاز طبیعی ترکیبی از گازهای هیدروکربنی و غیرهیدروکربنی بوده، اما غالباً متان است. صورت کلی مخازن گازها ناشی از مخازن هیدروکربوری به دو دسته همراه و مستقل تقسیم می‌شوند. منابع گازی مستقل عموماً در مخازن مستقل گازی یافت می‌شوند. گاز همراه به گازی که همراه نفت به صورت محلول یا جدا در کلاhek گازی باشد اطلاق می‌شود. البته دسته دیگری از منابع گازی هستند که از منابع غیرمخازن هیدروکربور مثل زغال سنگ یا هیدراته‌های کربنی به دست می‌آیند. در اوایل استخراج نفت ارزش سوختی گاز سنجیده نمی‌شد. مقدار زیادی از آن را می‌سوزانند،



همان‌طور که هم‌اکنون نیز در خاورمیانه و ایران رایج است، به این طریق هدر می‌رفت. در کارخانه‌های پتروشیمی اروپا و آمریکای شمالی سوزاندن گاز صرفاً جنبه اطمینان از امنیت دارد. علاوه بر متان که بین ۸۵ تا ۹۵ درصد ساختار این گاز را تشکیل می‌دهد، گازهای دیگر شامل هیدروکربن‌های اتان، پروپان، بوتان و پنتان (پارافین‌های دارای زنجیره کوتاه) و غیره هیدروکربن‌ها از جمله نیتروژن، هیدروژن، سولفاید و دی‌اکسیدکربن نیز می‌باشد. ترکیب دقیق آن بستگی به منبع و ماهیت گاز دارد. گاز «خشک» که به‌عنوان سوخت فسیلی به فروش می‌رسد حاوی متان، درصدی پروپان و بوتان است. بوتان و پروپان ممکن است مایع بوده و به‌عنوان گاز مایع به فروش برسد. گاز طبیعی خود ممکن است توسط افزایش فشار و کاهش دما به گاز مایع تبدیل شود که به‌عنوان گاز طبیعی مایع (الان‌جی)^۱ در آمریکای شمالی و مایع گاز طبیعی (ان‌جی‌ال)^۲ در اروپا شناخته می‌شود. گاز مایع امکان حمل‌ونقل آسان‌تر را برای مسافت‌های طولانی مهیا می‌کند.

۱-۶-۱. تاریخ و گسترش

در قرن ۱۹ کشف و گسترش گاز طبیعی به‌عنوان سوخت به‌طور همزمان در آمریکا و روسیه آغاز شد. اولین لوله گازی به طول ۲۲ کیلومتر در سال ۱۸۳۳ گاز را به پتسبورگ آمریکا منتقل کرد. در همین زمان بود که گسترش نفت و گاز طبیعی در میدان نفتی باکو، شوروی سابق، در نزدیکی دریای خزر اتفاق افتاد.

تا دهه ۱۹۵۰ میلادی استخراج و استفاده از گاز طبیعی به‌طور گسترده در دست آمریکا بود. در سال ۱۹۵۰ بالغ بر ۸۵ درصد گاز طبیعی در آمریکا استخراج می‌شد. ونزوئلا و روسیه به‌ترتیب با ۸ و ۴ درصد در مقام‌های دوم و سوم بودند. در آگوست سال ۱۹۵۹ اولین میدان بزرگ گازی گرونینگن در هلند به وسیله تیم اسو - شل کشف شد. کشورهای سواحل دریای شمال توافق کردند تا مقدار معینی گاز از میدان‌های گازی مشترک استخراج کنند؛ کشورهایی همچون بلژیک، آلمان، هلند، نروژ و بریتانیا. تا دهه ۱۹۷۰ کشورهای اروپای شرقی پیشرفت فراوانی در زمینه اکتشاف و صادرات گاز کردند.

۱-۶-۲. منابع گاز طبیعی

منابع گاز طبیعی در سرتاسر جهان گسترده شده‌اند (رجوع شود به فصل دوم). روسیه و ایران بیشترین ذخایر گازی را در جهان دارند. کشورهای دیگر نیز دارای منابع گازی غنی در جهان هستند. باید اشاره کرد که در مقایسه با نفت و زغال‌سنگ، حمل گاز طبیعی با لوله بسیار آسان است.

1. LNG
2. NGL

در مقایسه با توربین‌هایی که با سوخت هسته‌ای کار می‌کنند، توربین‌هایی که با گاز طبیعی کار می‌کنند ایمن‌تر، تمیزتر و با بهره‌وری بالا هستند. همین امر سبب شده است که نیروگاه‌های تولید الکتریسیته گازی در ایالات متحده و اروپا بیشتر شود. ساخت یک نیروگاه تولید الکتریسیته گازی تقریباً یک‌دوم ساخت نیروگاه تولید الکتریسیته زغال‌سنگ با همان میزان تولید الکتریسیته هزینه‌بر است. سؤالاتی وجود دارد مبنی بر اینکه آیا ذخایر گاز طبیعی به اندازه کافی در آینده وجود خواهد داشت که نیازهای موجود را برآورده کند؟ همان‌طور که اشاره شد علاوه بر میادین هیدروکربوری دو شیوه دیگر برای دستیابی به گاز متان وجود دارد. متان موجود در منابع زغال‌سنگ و گاز هیدرات طبیعی دیگر منابع دسترسی به گاز طبیعی هستند.

۱-۶-۲-۱. متان موجود در منابع زغال سنگ

متان حاصل از حرارت زغال‌سنگ دیگر روش تولید گاز طبیعی است. تا زمان استفاده گسترده از گاز طبیعی در دهه‌های ۱۹۷۰ و ۱۹۸۰ واژه گاز به معنای «گاز زغال‌سنگ» در اکثر کشورهای دنیا به‌کار می‌رفت. در بسیاری از کشورهای اروپایی قبل از پایان قرن ۱۸، گاز زغال‌سنگ به‌عنوان سوخت برای روشن کردن خیابان‌ها به‌کار می‌رفت. قرن ۱۹ شاهد پیشرفت صنعت گاز زغال‌سنگ در جهان بود. به مدت ۱۵۰ سال در ایالات متحده گاز زغال‌سنگ به‌عنوان یک صنعت تجارت در نظر گرفته می‌شد که در اوایل دهه ۶۰ پایان یافت. در پایان قرن ۱۹ مقدار زغال‌سنگی که برای تولید گاز در بریتانیا استفاده شد بیش از ۱۳ میلیون تن بود که درواقع بیشتر از مجموع چیزی بود که در باقی اروپا استفاده می‌شد.

۱-۶-۲-۲. گاز هیدرات طبیعی

یکی دیگر از منابع گاز طبیعی از منبعی است که به آن «گاز هیدرات» می‌گویند. این نوع گاز برای چند سال مدنظر بوده است و امروزه جزء منابع اصلی استخراج گاز متان است. این منبع در کف اقیانوس منجمد شمالی به‌صورت یخ‌زده وجود دارد. برآورد شده است که بالغ بر دو برابر مجموع منابع نفت، گاز و زغال‌سنگ دارای انرژی است.

۱-۶-۳. جنبه‌های زیست‌محیطی گاز طبیعی

گاز طبیعی درواقع دوست محیط زیست قلمداد می‌شود. پاک‌تر از نفت و زغال‌سنگ سوخته و آلودگی کمتری را تولید می‌کند. کشورهای اروپای شرقی و چین که هم‌اکنون برای تولید الکتریسیته وابسته به منابع زغال‌سنگ هستند تمایل بسیار زیادی برای استفاده از گاز طبیعی به‌جای زغال‌سنگ دارند. همان‌طور که همه انتظار دارند رابطه مستقیمی بین استفاده از گاز طبیعی و آزادسازی گاز دی‌اکسیدکربن وجود دارد.



هر سکوی گازی دریایی درواقع قسمتی از صنعت نفت بوده و خطراتی نیز دارد. میزان امنیت کشف و تولید گاز طبیعی با توجه به حوادث صنعتی و خطرات استخراج بسیار بالاست. با این وجود، تولید گاز نیازمند مراقبت‌های ویژه در زمان کشف و تولید برای حفاظت از آتش‌سوزی، انفجار و نشست است. تاکنون حادثه مهمی در مورد انتقال گاز یا نشست آن از تانکرهای ال‌ان‌جی گزارش نشده است. با این وجود، نشست گاز در یک منطقه، آن را از اکسیژن خالی و سبب از بین رفتن پوشش گیاهی آن منطقه برای ماه‌ها می‌شود.

سوختن گاز طبیعی باعث می‌شود که نیتروژن موجود در اتمسفر اکسید شده. اکسید شدن نیتروژن نیز سبب به‌وجود آمدن اسید می‌شود. در ترکیب با دی‌اکسید سولفور، اکسید نیتروژن می‌تواند برای پوشش گیاهی سمی باشد. به هر حال، تأثیرات کلی استفاده از گاز طبیعی کمتر از زغال‌سنگ است.

۷-۱. انرژی زمین‌گرمایی

انرژی زمین‌گرمایی انرژی گرمایی است که در زیر سطح زمین نهفته است. این نوع انرژی، انرژی تجدیدپذیری نیست، زیرا استفاده بیش از حد آن سبب از بین رفتن منبع می‌شود. با این وجود، میزان بالای دسترسی به این انرژی طوری است که این انرژی، تجدیدپذیر محسوب می‌شود. ذخایر انرژی منابع زمین‌گرمایی عموماً در بخار آب یا مایع داغ و یا هر دو در سفره‌های زیرزمینی می‌باشد. بخش دیگری از این انرژی در سنگ‌های رسوبی نهفته است.

انرژی گرمایی از عمق زمین با نرخ معادل 0.063 W/m^2 بیرون می‌آید. همان‌طور که در بخش اول این فصل بحث شد، میزان این جریان معادل 10.12×10^3 وات می‌باشد. میزان گرمای داخلی زمین که به بیرون راه پیدا می‌کند معادل یک‌هزارم انرژی خورشیدی است که در همان منطقه به زمین می‌تابد. انرژی زمین‌گرمایی سطحی مقدارش برای استخراج بسیار کم است مگر اینکه در مناطق گرم آتشفشان‌ها یا چشمه‌های آب گرم باشد.

۱-۷-۱. ساختار زمین‌شناسی زمین

ساختار زمین‌شناسی زمین به پنج قسمت هم‌مرکز تقسیم می‌شود. این ساختار از بیرون به درون شامل اتمسفر، پوسته، جبه، هسته مایع بیرونی و هسته جامد درونی است. هرچقدر به درون نزدیک‌تر می‌شویم درجه حرارت و چگالی افزایش می‌یابد. در چاه‌های غیرآتشفشانی متوسط درجه حرارت به‌ازای هر کیلومتر عمق بین ۱۷ تا ۲۰ درجه سانتیگراد افزایش می‌یابد. در مناطق آتشفشانی ضریب گرما بیشتر است.

پوسته زمین از صخره‌های بازالتی و سیلیکنی تشکیل شده که ضخامتشان یکپارچه نیست. زیر اقیانوس‌ها پوسته زمین حدود ۱۵ کیلومتر ضخامت دارد که از سنگ‌های متخلخل تشکیل شده است. زیرتوده‌های زمین قاره‌ای پوسته زمین ۳۵ کیلومتر ضخامت دارد.

پوسته زمین همانند یک صدف سخت و جامد نیست، بلکه از بخش‌های شکننده بسیاری تشکیل شده است که به آن رویه می‌گویند. گاهی اوقات این قسمت‌ها ممکن است نسبت به یکدیگر حرکت کنند که به آن جدا شدن قاره‌ای می‌گویند. در برخی مواقع فشار دور این پوسته جمع شده و سبب حرکت سطح پوسته می‌شود که همین امر سبب زمین‌لرزه می‌شود. کنترل تأثیرات زمین‌شناسی در مقیاس بزرگ بسیار دشوار است. برخی اقدامات در کانادا و ایالات متحده صورت می‌پذیرد به عنوان مثال با تزریق آب به بین این سطوح سبب حرکت روان‌تر آن را فراهم می‌آورند.

بین پوسته و جبه زمین محدوده‌ای وجود دارد که به آن گسل زمین‌لرزه‌ای می‌گویند. این قسمت از مواد با ویژگی‌هایی تشکیل شده است که با پوسته کاملاً فرق دارد.

جبه از لحاظ حجمی بیشترین قسمت ساختار زمین است (حدود ۸۰ درصد). این قسمت از صخره‌های بسیار غلیظ با دمای بین ۶۵۰ تا ۱۲۵۰ درجه سانتیگراد تشکیل شده است و عموماً سیلیکات آهن و منیزیم در خود جای می‌دهد. جبه بالایی و جبه پایینی به ترتیب ۵۹۰ و ۱۱۸۰ مایل ضخامت دارند. گدازه‌های آتشفشانی از سیلیکات‌های جبه تشکیل شده است.

تلاش‌های زیادی برای پی بردن به ماهیت موادی که هسته بیرونی و هسته درونی را تشکیل می‌دهند انجام شده است. مطالعات زیادی پیرامون هسته مایع/جامد که از نیکل آهن یا آهن ساخته شده است صورت گرفته اما به صورت یک حدس علمی باقی مانده است. هسته بیرونی ۱۳۱۰ مایل ضخامت دارد درحالی که هسته درونی ۸۴۰ مایل ضخامت دارد. در هسته زمین دما ممکن است به ۴۰۰۰ تا ۷۰۰۰ درجه سانتیگراد برسد.

هنوز تکنولوژی مبنی بر اندازه‌گیری مستقیم و یا حتی تخمین حرارت هسته مرکزی زمین کشف نشده است. معمولاً ترک‌ها یا شکاف‌هایی در پوسته زمین به دلیل حرکت صفحات اتفاق می‌افتد. دیواره‌های ماگما چون شناور هستند خود را به پوسته نزدیک کرده و گرمای زیادی را به پوسته زمین وارد می‌کنند. در چنین مکان‌هایی است که آتشفشان‌ها شکل می‌گیرند. فعالیت‌های آتشفشانی بسیار مهیب و گاهی اوقات زیباست، اما قابل کنترل یا پیش‌بینی نیست. آتشفشان‌ها هنوز به عنوان یک خطر شناخته می‌شوند تا یک منبع انرژی. شکل زیر مناطقی را که از لحاظ فعالیت‌های زمین‌گرمایی بالا هستند نشان می‌دهد.



شکل ۱-۲. مناطق مستعد تولید انرژی زمین گرمایی



Source: Ibid.

۱-۷-۲. منشأ جریان زمین گرمایی

باور سنتی در مورد انرژی زمین گرمایی این است که انرژی گرمایی موجود در زمین از اعماق گرم به سطح زمین هدایت می شود. در طول زمان سطح بیرونی زمین در نتیجه سرعت بالای خنک شدن شکل گرفته است. توده های از صخره های گردان درون ماگما توسط فعالیت های گرانشی سبب به وجود آمدن اصطکاک می شود که گرما تولید می کند. یک تئوری جدیدتر بیان می دارد که زمین یک کوره بسیار بزرگ است. زوال رادیواکتیو پتاسیم، اورانیم و توریم در پوسته زمین تولید گرما می کند. بخش دیگری از گرما از تجمع مواد رادیواکتیو درون جبه در زیر پوسته حاصل می شود.

۱-۷-۳. منابع انرژی زمین گرمایی

مقدار انرژی زمین گرمایی زمین بسیار بالا می باشد. البته هیچ گونه عدد و رقمی از ارگان های ملی و بین المللی برای این مسئله وجود ندارد. تخمین های زیادی در این زمینه زده شده است که همگی رقم های کاملاً متفاوتی را ارائه داده اند. ارزیابی انجام شده به وسیله کنفرانس انرژی جهانی در سال ۱۹۸۰ در مورد منابع زمین گرمایی در مورد زمین های قاره ای در عمق ۳ کیلومتری زمین برای اهداف تولید انرژی برای استخراج معادل 10^{20} ژول است. این در واقع معادل ۱۰ برابر انرژی مصرف شده اولیه در آن زمان بوده است. تمام اعداد تخمین زده شده پیرامون میزان انرژی زمین گرمایی باید به عنوان یک فرضیه در نظر گرفته شوند. این غیرقابل انکار است که انرژی بسیاری هنوز استخراج نشده است. در عمق ۹/۶۵ کیلومتری میزان متوسط درجه حرارت برابر ۱۰۰ درجه سانتیگراد است. جالب است بدانیم نقاط گرمی روی زمین وجود دارند که حتی از این نیز کم عمق تر هستند.

۴-۷-۱. منابع زمین‌گرمایی

آبی که توسط صخره ماگما داغ گرم می‌شود می‌تواند به‌عنوان چشمه آب گرم یا بخار به سطح زمین بیاید. یکی از بهترین نمونه‌ها می‌تواند آشفشان کالیفرنای شمالی در آمریکا باشد. آب‌های معدنی طبیعی در سرتاسر جهان جهت مصارف پزشکی و درمانی برای حداقل ۲۰۰۰ سال مورد استفاده بوده‌اند. حمام‌های معدنی که به دوره رم باستان (۵۵ سال قبل از میلاد تا ۴۰۰ سال بعد از میلاد) برمی‌گردد هنوز نیز در بئ انگلستان مورد بازدید قرار می‌گیرد. چشمه‌های آب گرم که در واقع از آب گرم زمین‌گرمایی استفاده می‌کنند در اروپا، آسیا، خاورمیانه، آمریکای شمالی و جنوبی، آسیای شرقی و نیوزیلند بسیار مورد توجه قرار گرفته است. شکل ۲-۱ نشان می‌دهد که انرژی زمین‌گرمایی بیش از نفت و گاز طبیعی در سرتاسر جهان گسترده شده است. برای مثال، ممکن است منبع انرژی با ارزشی برای کشورهای آفریقایی شرقی که فقیر هستند قلمداد شود.

آب‌های زمینی و آب‌های حاصل از آب شدن برف‌ها از میان صخره‌های نفوذپذیر پوسته مانند سنگ آهک و ماسه سنگ به درون صخره‌ها نفوذ می‌کند. این منابع ممکن است چند مایل عمق داشته باشد. در همین مناطق منفذدار آب به‌وسیله ماگما گرم شده و به‌صورت آب یا بخار به سطح زمین برمی‌گردد.

در فشار اتمسفر سطحی، آب در دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد به جوش می‌آید. به دلیل فشار بالا در عمق ۸-۹ کیلومتری زمین، آب به‌صورت مایع باقی مانده و به بخار تبدیل نمی‌شود حتی اگر دما به چندصد درجه سانتیگراد برسد. غلظت آن به دلیل افزایش حجم کاهش می‌یابد و سبب می‌شود تا به دلیل شناور بودن به سطح زمین برسد. گاهی اوقات شرایط فشار چنان بالا بوده که در سطح به بخار تبدیل می‌شود یا از طریق سوراخ‌های ساخته شده به دست انسان یا چشمه‌ها به‌صورت بخار به سطح زمین می‌رسد.

اگر آب گرم شده بین صخره به یک لایه سنگی غیرقابل نفوذ برسد و همانجا در بین صخره‌های غیرقابل نفوذ باقی بماند، این امر باعث به‌وجود آمدن ذخایر زمین‌گرمایی می‌شود. ذخایر زمین‌گرمایی به عمق ۳۰۰۰ متری نیز می‌رسد. حتی در ۵۰۰ درجه سانتیگراد نیز فشار بالا ممکن است جلوی جوشیدن ذخایر آبی را بگیرد. درجه آب یا بخار ممکن است تا ۷۰۰ درجه سانتیگراد برسد. برای دستیابی به این منبع انرژی همانند صنعت نفت و گاز باید تا این اعماق حفاری شود.

مخازن بسیار بزرگ ممکن است منابعشان در عمق بسیار کمتری باشد که آب در ۱۰۰ یا ۲۰۰ درجه سانتیگراد به جوش بیاید. این امر ممکن است سبب شکل‌گیری چشمه‌های آب گرم



حوضچه‌های گل جوشان شود. آب گرم تا ۷۵ درجه سانتیگراد از چشمه‌های آب گرم با حفاری سوراخ‌هایی تا عمق ۱/۵ تا ۲ کیلومتر قابل دستیابی است. این امر با ضریب ۳۰ درجه سانتیگراد در کیلومتر همخوانی دارد. این منابع با درجه پایین اگر نزدیک مناطق پرجمعیت باشد تنها ارزش استخراج برای گرم کردن فضاها، مسکونی و تجاری را دارد.

همان‌طور که اشاره شد با افزایش عمق، حرارت زمین نیز افزایش می‌یابد. به همین دلیل هر چه آب ذخیره شده در مناطق عمیق‌تری قرار گیرد از گرمای بیشتری برخوردار خواهد بود. با افزایش عمق می‌تواند آب از حالت مایع به بخار تبدیل شود. به همین دلیل برای دستیابی به منابع گرمایی بیشتر باید تا اعماق بیشتری حفاری کرد. واضح است که بشر برای مصارف گوناگون از دماهای مختلفی استفاده می‌کند. به عنوان مثال به منظور گرم کردن استخر منازل به دمای بیش از ۳۰ درجه نیاز نیست. اما این دما برای موتورخانه منازل تا ۸۰ درجه افزایش می‌یابد. در استفاده‌های صنعتی این دما به حدود ۲۰۰ درجه هم می‌رسد. انرژی زمین‌گرمایی قابلیت تأمین همه این درجات را دارد. گرمای حاصل از زمین با هر درجه‌ای اعم از گاز یا مایع می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. جالب است بدانیم که ۹۰ درصد انرژی مصرفی جهان برای اهداف گرمایی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

مشکل مصارف زمین‌گرمایی در دسترس بودن آن است تا استفاده آن. اگر انرژی زمین‌گرمایی به وفور در دسترس بود می‌توانست ۲۰ تا ۵۰ درصد انرژی مورد نیاز را برای کشورهای صنعتی فراهم کند. اما در کشورهای اروپای شمالی و قسمت‌های شرقی ایالت‌های آمریکا این منبع در دسترس نیست.

۵-۷-۱. مکان و نوع منابع زمین‌گرمایی

چهار نوع منبع زمین‌گرمایی وجود دارد: بخار خشک، بخار نمدار، آب شور داغ و صخره داغ. در برخی از مناطق انرژی زمین‌گرمایی کاملاً مشهود است که در قسمت‌های سطحی همانند چشمه‌های آب گرم وجود دارد.

۱-۵-۷-۱. منابع بخار خشک

میادین زمین‌گرمایی خشک، بخار اشباع یا فوق گرم با فشاری برابر چند اتمسفر تولید می‌کنند. دسترسی به این میادین عموماً نیاز به حفاری تا اعماق زیاد دارد. این نوع از منابع بسیار نادر بوده اما از لحاظ اقتصادی بسیار به صرفه هستند، زیرا کمترین خردگی را برای تجهیزات ایجاد می‌کنند.

۲-۵-۷-۱. منابع بخار نمدار

میادین زمین‌گرمایی نمدار، آب تحت فشار با دمایی در حدود ۱۸۰ تا ۳۷۰ درجه سانتیگراد تولید می‌کنند که اغلب دارای ناخالصی و آلودگی مانند گازهای سولفور می‌باشد. زمانی که این آب با این

فشار به سطح زمین می‌رسد، ۱۰ تا ۲۰ درصد آن به دلیل کاهش فشار به بخار تبدیل می‌شود. میادین زمین‌گرمایی نمودار در حدود ۲۰ برابر بیشتر از منابع زمین‌گرمایی خشک فراوانی دارند.

۳-۵-۷-۱. میادین آب شور داغ

این میادین از فراوانی بیشتری نسبت به میادین ذکر شده برخوردار است. حجم آب نمکی که باید مدیریت شود بسیار زیاد است. در محل‌های که آب نمک در زیر زمین قرار می‌گیرد از بین بردن حجم بالای آب ممکن است مشکلات اکولوژیکی مهمی را مانند رانش زمین به وجود آورد تا آنجا که ممکن است نیاز باشد تا دوباره آب به میدان تزریق شود.

۴-۵-۷-۱. منابع صخره‌های خشک

اغلب منابع قابل استخراج زمین‌گرمایی در صخره‌های خشک ذخیره شده است تا در آب یا بخار آب. ضریب دمای زمین‌گرمایی در سرتاسر جهان بین ۲۰ تا ۳۰ درجه سانتیگراد در هر کیلومتر است. این میزان گرما کافی است تا دمای ۸۰ درجه سانتیگراد برای گرمای فضا در عمق ۲/۲ کیلومتری و دمای ۱۸۰ درجه سانتیگرادی در عمق ۵/۵ کیلومتری تولید شود. در برخی مناطق زمین‌شناسی با دمای بالا یا دمای متوسط، گاهی اوقات ضریب گرمایی به ۴۰ درجه سانتیگراد در هر کیلومتر می‌رسد.

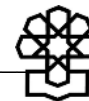
به منظور دستیابی به انرژی این صخره‌ها باید میزان مشخصی آب به آنها تزریق کرد تا هم با شکاف صخره‌ها مسیر حرکت ایجاد شود و هم آب به عنوان جاذب گرما از این شبکه‌ها عبور کرده و گرما را به سطح منتقل کند. شکستن صخره‌ها به وسیله فشارهای گرمایی یا آب سرد و یا انفجارهای هسته‌ای و شیمیایی به دست می‌آید. این تکنیک بی‌شباهت به تکنیک استخراج نفت خام نیست.

۶-۵-۷-۱. ماگما مذاب

ماگما یا مواد مذاب همان شیوه شدید شده صخره داغ است. این موارد در دمای بیشتر از ۶۵۰ درجه سانتیگراد در حفره واقع در سطح آتشفشان‌ها و یا در منابع زیر آنها یافت می‌شود. اگرچه تحقیقات در حال انجام است، وسیله عملی برای استخراج این گرما وجود ندارد.

۶-۷-۱. ویژگی‌های زیست‌محیطی نیروی زمین‌گرمایی

مشکلات زیست‌محیطی ممکن است در گسترش و استفاده از منابع انرژی زمین‌گرمایی وجود داشته باشد. بهره‌برداری اولیه از سایت، خصوصاً کندن زمین سبب ایجاد سروصدا، خسارت‌های سطحی و بر هم زدن آرامش اهالی می‌شود. شاید لازم باشد تا راه‌های ارتباطی برای حمل مواد اولیه و ابزارآلات سنگین ساخته شود. گسترش یک سایت نیازمند کارهای زیادی از قبیل کنده‌کاری،



ساخت و ساز، ابزارآلات و لوله‌گذاری است. بسته به مکان اجرای این عملیات، این فرآیند ممکن است زیبایی یک مکان را بر هم زند.

گسترش هر نوع سیستم زمین‌گرمایی نیازمند به‌کارگیری سیستم توزیع گرماست. همانند سیستم توزیع الکتریسیته یا نفت و گاز، مشتریان انرژی را می‌خواهند و نه ابزار تحویل آن را. این لوله‌ها نیازمند آن هستند که از رو یا زیر زمین عبور کرده تا ساختارهای صنعتی را شکل دهند.

گاز سولفید هیدروژن گاهی اوقات در ذخایر زمین‌گرمایی وجود دارد. گاز سولفید هیدروژن از آنجایی که بوی تخم‌مرغ گندیده را می‌دهد توسط سیستم بویایی قابل شناسایی است. از آنجا که میزان بالای این گاز سمی برای سلامتی کارگران مضر است، باید آن را کنترل کرد. تجهیزات مورد نیاز برای استخراج منابع زمین‌گرمایی سبب از بین رفتن حدود ۹۹ درصد از این گاز می‌شود. تلاش‌های اولیه برای سوراخ کردن زمین در منابع زمین‌گرمایی در بریتانیا میزان بالایی سولفید هیدروژن آزاد کرد.

دی اکسید کربن (گاز اصلی تغییر آب و هوا) معمولاً در بخار منابع زمین‌گرمایی وجود دارد اما نیروگاه‌های زمین‌گرمایی تنها میزان ۴ درصد از این گاز را در مقایسه با سوخت‌های فسیلی آزاد می‌کنند. زمانی که از تکنولوژی سیکل بسته استفاده شود اصلاً گازی آزاد نمی‌شود.

۷-۱-۷. حفاظت از آب‌های زیرزمینی

آب‌های زمین‌گرمایی میزان بالایی از مواد معدنی حل نشده را در مقایسه با سفره‌های آب سرد زیرزمینی شامل می‌شوند. در چاه‌های زمین‌گرمایی، لوله‌ها معمولاً با سیمان به زمین وصل می‌شوند تا جلوی ترکیب شدن آب زمین‌گرمایی با آب‌های زیرزمینی را بگیرد.

زمانی که آب‌های زمین‌گرمایی معدنی نیاز به ذخیره شدن در سطح زمین داشته باشند، آن را در چاه‌های غیرقابل نفوذ نگه می‌دارند. پس از استفاده، آب زمین‌گرمایی یا بخار می‌شود و یا از طریق استفاده از لوله‌ها به منابع عمیق باز گردانده می‌شوند.

۸-۱. انرژی آبی

استفاده از یک جریان آب متحرک به‌عنوان منبع انرژی هزاران سال مورد استفاده بوده است. توربین‌های اولیه آب جهت آبیاری به‌کار می‌رفت. در نقاط مختلف جهان آسیاب‌های آبی صدها سال به‌عنوان منبع انرژی جهت آسیاب کردن گندم مورد استفاده بوده است.

۱-۸-۱. تولید نیروی الکتریکی آبی

استفاده اصلی نیروی آب به عنوان محرک اولیه برای تولید الکتریسیته می باشد. اولین نمونه تولید نیروی الکتریکی آبی در بریتانیا به سال ۱۸۸۰ باز می گردد. این یک نیروگاه شخصی بود که با نیروی ۵ کیلووات، برق یک گالری عکس را در فاصله ۱/۵ کیلومتری تأمین می کرد. در سال ۱۸۸۱ الکتریسیته تولید شده از رودخانه ساری در انگلستان برای روشن کردن خیابان های شهر گودالمینگ مورد استفاده قرار گرفت. در همان دوره زمانی در سال ۱۸۸۲ یک نیروگاه الکتریکی آبی با قدرت ۲۵ کیلووات روی رودخانه فاکس ریور در اپلتون واقع در ویسکونسین آمریکا نیروی مورد نیاز برای دو آسیاب و برق ساکنین را فراهم می کرد.

اولین نیروگاه بزرگ تولید نیروی الکتریکی آبی در آبشار نیاگارا واقع در نیویورک آمریکا با قدرت تولید ۸۲۰۰ کیلووات الکتریسیته در سال ۱۸۹۵ ساخته شد. کانادا نیروگاه ۹/۳ مگاواتی را در سال ۱۹۰۳ در آبشار نیاگارا راه اندازی کرد.

حدود یک چهارم الکتریسیته مورد نیاز جهان در سال ۲۰۰۰ از طریق نیروی الکتریکی آبی تأمین شد. در اوایل دهه هشتاد کشورهایمانند برزیل، چین، موزامبیک و زامبیا حدود ۸۵ درصد از الکتریسیته مورد نیاز خود را از طریق نیروی الکتریکی آبی برآورده می کردند. در همان سال ها کشورهای اسکندیناوی و کانادا بیشتر الکتریسیته مورد نیاز خود را از نیروی الکتریکی آبی تأمین کردند. تا سال ۲۰۰۰ ایالات متحده ۱۸ درصد از الکتریسیته مورد نیاز خود را به وسیله نیروی الکتریکی آبی برطرف می کرد. بزرگ ترین نیروگاه نیروی الکتریکی آبی در جهان در آبشار چرچیل لابرادور واقع در کانادا است که بیش از ۵۰۰۰ مگاوات نیروی الکتریسیته تولید می کند. هر ۲۰ سال نیروی الکتریکی آبی در جهان دو برابر می شود. کشورهای توسعه یافته توانایی آن را دارند که این میزان را بسیار افزایش دهند.

برای افرادی که عادت به نیروگاه های سوخت فسیلی دارند یک نیروگاه تولید نیروی الکتریکی آبی کمی عجیب است، زیرا این نیروگاه ها فاقد دودکش و برج های خنک کننده است.

هزینه ساخت یک نیروگاه تولید نیروی الکتریکی آبی بسیار گران تر از ساخت نیروگاه گرمایی است. دلیل این امر نیز هزینه های مهندسی عمران، ساخت سد، ساخت جاده، جای ذخیره و... است. از طرف دیگر، از آنجایی که سوخت مورد نیاز برای راه اندازی نیروگاه رایگان است، هزینه تولید نیروی الکتریکی آبی بسیار پایین است. از آنجا که هزینه سوخت فسیلی مانند نفت و گاز و زغال سنگ بالاست، به نظر می رسد که راه اندازی نیروگاه تولید نیروی الکتریکی آبی بسیار سودمند است.



۲-۸-۱. تأثیرات زیست‌محیطی

مقدار زیاد هیدروالکتریسیته مزایای زیادی دارد: معمولاً ارزان است، سوخت فسیلی مصرف نمی‌کند، کربن مستقیم آزاد نمی‌کند و ذخایر آن ممکن است امکانات تفریحی فراهم کند. به هر حال، تأثیرات منفی نیز وجود دارد که برخی از آنها قابل توجه‌اند و منجر به اعتراض پیرامون ساخت سدهای جدید در مناطق حساس می‌شود. این تأثیرات شامل:

- نیاز برای اسکان دوباره تعداد زیادی از افراد،
- از بین رفتن بقایای باستانی،
- از دست دادن زیستگاه،
- از بین رفتن گونه‌های نادر،
- تأثیرات اساسی روی حیات وحش رودخانه و انسان‌هایی که پایین سد ساکن‌اند،
- آزاد شدن گاز متان از بقایای گیاهان در مناطق آب‌گرفته،
- از بین رفتن زندگی مردم به‌خاطر شکستن سد،
- بالا گرفتن تنش‌ها به‌دلیل انحراف منابع آبی.

تمام این مشکلات به همه پروژه قابل تعمیم نیست و بسیاری از آنها به ابعاد پروژه بستگی دارد. به‌عنوان مثال ساخت طرح هیدروالکتریک تری گورجز^۱ در چین تأثیرات زیست‌محیطی فراوانی داشت. این پروژه بیش از صدها شهر را از بین برد و تأثیرات زیست‌محیطی شگرفی در پی داشت. اگرچه مقداری آب از سطح ذخایر بخار می‌شود، اما قسمت اعظم کم شدن آب در مناطق پایین‌دست به‌دلیل انحراف آب برای مقاصد کشاورزی است. همین امر سبب مشکلات عدیده‌ای برای حیات وحش رودخانه در پایین‌دست سد می‌شود. اگر ساخت یک طرح هیدروالکتریک نیازمند از بین بردن جنگل‌های فراوانی باشد، سهم فراوانی از زندگی گیاهی زیر سطح آب می‌رود.

۹-۱. انرژی باد

انرژی باد از تابش انرژی خورشید سرچشمه می‌گیرد. حرکت توده هوا در اتمسفر توسط انرژی خورشید صورت می‌پذیرد. به‌عبارت دیگر گرم شدن نامتوازن زمین و جو موجب ایجاد باد در مناطق نزدیک به زمین می‌شود.

درست همانند انرژی خورشیدی، انرژی باد نیز از لحاظ زیست‌محیطی بسیار تمیز بوده و تجدیدپذیر است. هیچ نوع آلودگی و استفاده مستقیم از سوخت فسیلی در انباشتن این نوع انرژی

وجود ندارد. برخلاف انرژی خورشیدی، انرژی باد محدود به زمان و روز نبوده، چرخشی یا ادامه‌دار نیست، بلکه متناوب بوده و غیرقابل پیش‌بینی است.

انرژی بادی هزاران سال در سرتاسر جهان مورد استفاده بوده است. دستگاه‌های بادی به‌صورت ساختار محور عمودی بوده که در چین، هند، افغانستان و خاورمیانه مخصوصاً ایران در حدود ۲۵۰ سال قبل از میلاد مسیح مورد استفاده بوده است. بسیاری از این دستگاه‌های اولیه برای پمپاژ آب جهت آبیاری مزارع به‌کار می‌رفته است.

دستگاه‌های بادی با محور افقی توسط عرب‌ها ساخته شد و در سرتاسر جهان عرب مورد استفاده قرار گرفت. در قرن ۱۱ این نوع دستگاه‌ها در اروپا مورد استفاده قرار می‌گرفت که بیشتر به‌صورت برج و بادبان بود که آن را با نام آسیاب بادی می‌شناختند. تخمین زده می‌شود که در سال ۱۷۵۰ حدود ۸۰۰۰ آسیاب در هلند و ۱۰۰۰۰ عدد نیز در آلمان مورد استفاده بوده است. ساکنان هلندی در شمال آمریکا در طول سواحل شروع به ساختن این آسیاب‌ها کردند که یکی از این نمونه‌ها آسیاب‌های بادی منهن بود.

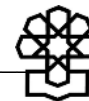
انرژی باد هزاران سال نیروی اصلی محرک کشتی‌ها بوده است. ثروت نیروهای استعمارگر اروپایی نظیر انگلیس، فرانسه، اسپانیا، هلند، بلژیک و پرتغال وابسته به دریا و نیروی دریایی بود. به‌دلیل نامشخص بودن زمان دسترسی به نیروی باد این انرژی جای خود را به سوخت فسیلی برای کشتی‌های تجاری داد. امروزه از موتورهای دیزلی برای این مقصود استفاده می‌شود اما هنوز قایق‌های بادی از وسایل تفریحی در سرتاسر جهان به‌حساب می‌آیند.

۱-۹-۱. سیستم‌های مدرن انرژی بادی

سیستم‌های مدرن بادی عموماً شامل سه بخش عمده تولیدکننده یا پره‌ها، جعبه دنده و توربین است. بسیاری از مطالعات در اروپا و آمریکا بیانگر این مهم است که ماشین‌های بادی بزرگ نسبت به ماشین‌های بادی کوچک از لحاظ عملکرد مقرون به صرفه‌تر هستند. برای کارهای بزرگ و کوچک، انرژی باد، تولید نیروی الکتریکی در مدت‌زمان کوتاه را نوید می‌دهد. تجهیزات کنونی عموماً توانایی تولید با نیروی خروجی ۱ تا ۵ مگاوات را دارند.

۱-۹-۲. شروع توربین‌های بادی

اولین توربین بزرگ بادی موفق در اواخر دهه ۴۰ میلادی در ورمونت آمریکا ساخته شد که نامش دستگاه اسمیت پوتنام بود. همین دستگاه شخصی انگیزه‌ای شد برای تولید صنعتی توربین‌های بادی. همانند تمام ماشین‌های دارای محور افقی، ژنراتور و جعبه دنده در بالای سر توربین در بالای برج قرار داشتند. دستگاه اسمیت پوتنام یک دستگاه دو تیغه‌ای بود که ۱/۲۵ مگاوات



الکتریسیته تولید می‌کرد و قطر تیغه‌ها ۵۳/۳۴ متر بود. به مدت ۳۵ سال این دستگاه بزرگ‌ترین ماشین لقب گرفت. ژنراتور الکتریکی دستگاهی بود که به‌طور مستقیم نیروی الکتریکی را برای مصرف ایجاد می‌کرد.

دستگاه اسمیت پوتنام به‌زودی دچار خرابی در یکی از پره‌هایش شد. شرکت مسئول به این نتیجه رسید که تعمیر آن مقرون به صرفه نبوده و آن را در سال ۱۹۴۵ تعطیل کرد. اگرچه دستگاه اسمیت پوتنام روی هم رفته به مدت ۱۸ ماه فعال بود، زمینه را برای سیستم‌های نیروی بادی بعدی فراهم آورد. مشکل ایجاد شده در آن توربین نه به‌دلیل طراحی بلکه به‌دلیل استفاده از مواد نامناسب بود. بعدها با پیشرفت و اکتشاف مواد جدیدتر مشکل توربین اسمیت برطرف شد. اگرچه پروژه دستگاه اسمیت پوتنام با شکست مواجه شد، این دستگاه برای مدت مدیدی کار کرد تا ثابت کند که استفاده از دستگاه‌های بزرگ تولید الکتریسیته از نیروی باد ممکن است.

۳-۹-۱. تجهیزات بزرگ نیروی باد

طراحی، ساخت و اجرای سیستم‌های توربین بادی بزرگ (از چند صد کیلووات تا چند مگاوات) برای تولید الکتریسیته اکنون یک تکنولوژی رو به رشد است. بسیاری از سیستم‌های بزرگ از محورهای افقی با طراحی پروانه‌های دو تیغه‌ای استفاده می‌کنند. اگرچه بسیاری از مشکلات مهندسی و علمی پایه‌ای حل شده است، هنوز هم مشکلات سیاسی، اقتصادی و زیست‌محیطی مدنظر هستند. در اوایل دهه هفتاد میلادی با شروع بحران قیمت نفت و آغاز به‌کار اوپک رویکرد دوباره به انرژی‌های نو از جمله انرژی بادی آغاز شد. از اوایل دهه هفتاد خصوصاً ایالات متحده سرمایه‌گذاری فراوانی در زمینه پیشرفت توربین‌های بادی و تولید الکتریسیته از آن انجام داد. این امر توسط سازمان گسترش تحقیقات الکتریسیته آمریکا تحقق پذیرفت.

در سال ۱۹۷۴ اولین ماشین ۱۰۰ کیلوواتی از جانب این سازمان تولید شد. این توربین پروانه‌های دو تیغه‌ای با قطر ۳۸/۱ متر داشت. ژنراتورهای همزمان ای سی از طریق جعبه دنده‌ها فعال شده و نیروی الکتریکی را تولید می‌کردند. دستگاه‌های بعدی به ۲۰۰ کیلووات ارتقا یافتند.

سیستم توربین بادی ام او دی ۱ که در سال ۱۹۷۹ تولید شد، بزرگ‌ترین توربین جهان بود. این دستگاه توانایی تولید ۲ مگاوات نیرو را داشت و قطر تیغه‌اش برابر ۶۰/۹۵ متر بود. بعد از آن بود که در سال ۱۹۸۰ دستگاهی با قدرت ۲/۵ مگاوات با قطر تیغه‌های ۹۱ متر ساخته شد. در اواخر دهه ۱۹۸۰ دستگاه ام او دی ۵ با ظرفیت تولید ۷/۳ مگاوات نیرو با پروانه‌های دو تیغه‌ای رو به باد و با قطر تیغه‌های ۱۲۲ متر مورد استفاده قرار گرفت. این پروژه به‌دلیل قیمت پایین نفت و کاهش تقاضا برای الکتریسیته از آنجا که دیگر صرفه اقتصادی نداشت، نیمه‌تمام رها شد.

به دلیل مسائل اقتصادی این دستگاه‌ها باید در جایی نصب شوند که سرعت باد برابر یا بیشتر از ۱۵ متر بر ساعت باشد.

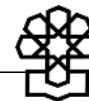
طراحی و پیشرفت توربین‌های بادی بیشتر در انحصار دانمارک و آلمان است. در دهه ۱۹۸۰ کارهایی روی توربین‌های چند صد کیلوواتی صورت گرفت. این تلاش‌ها هم‌اکنون به ۸۰۰ تا ۹۰۰ کیلووات رسیده است. اولین نسل دستگاه‌های ۱/۵ مگاواتی در سال ۱۹۹۵ در واقع یک گام بزرگ بود. تا سال ۲۰۰۲، ۱۱۰۰ مورد از این نوع دستگاه در حال فعالیت بود.

در سال ۲۰۰۰ حدود ۱۴۹۶ توربین با توان متوسط ۱۱۵۰ کیلووات در آلمان نصب شد. پروژه‌های بادی دریایی جدیدی در دانمارک، سوئد و بریتانیا از سال ۲۰۰۱ آغاز شد. توربین‌های دریایی که در میان اقیانوس نصب می‌شوند نیاز به ساختارهای قابل اعتمادتری نسبت به بادهای خشکی دارند، زیرا در آب و هوای بد ممکن است دسترسی به درون دریا غیرممکن باشد.

الکتریسیته تولید شده در درون دریا می‌تواند به دو شیوه مورد استفاده قرار گیرد. راه‌حل اول اینکه به وسیله کابل از زیر دریا به شبکه فشار قوی خشکی متصل شود. پیش از این سیستم برای انتقال الکتریسیته حاصل از نیروگاه‌های اتمی فرانسه به انگلیس از طریق دریا استفاده شده بود. در راه‌حل دوم، از الکتریسیته تولیدی برای الکترولیز آب دریا به اکسیژن و هیدروژن استفاده می‌شود. هیدروژن تولیدی فشرده شده به ساحل منتقل شده و سپس این هیدروژن برای تولید الکتریسیته استفاده می‌شود.

در بریتانیا نمونه‌های آزمایشی این دستگاه‌ها از سال ۱۹۳۰ کار گذاشته شده‌اند، اما هیچ‌کدام به‌طور جدی مورد بهره‌برداری قرار نگرفتند. در سال ۱۹۵۰ یک نمونه دستگاه ۱۰۰ کیلوواتی توسط شرکت نیروی الکتریکی بریتانیا طراحی و ساخته شد که بعد معلوم شد بهره‌وری پایین و غیرقابل قبولی داشته است. همچنین اعتراضاتی مبنی بر مکان همیشگی آن در سواحل ولز شمالی صورت گرفت. این ماشین هم‌اکنون به مدت ۴۰ سال است که در الجزایر عملکرد مطلوبی داشته است.

تا سال ۲۰۰۲ بزرگ‌ترین توربین که از عملکرد مطلوبی برخوردار بود در جزایر اورکنی بریتانیا قرار داشت. جزایر اورکنی، خارج از سواحل شمالی اسکاتلند، در نقطه پر باد جهان با سرعت متوسط باد بالغ بر ۳۸ متر بر ساعت واقع شده است. این سرعت بالا اجازه می‌دهد که دستگاه ۳ مگاواتی از تیغه‌های با قطر ۶۰ متر و بلندای ۴۶ متر بهره جوید. نیروی الکتریکی تولید شده توسط دستگاه‌های این جزیره جایگزین نیروی الکتریکی دیزلی شده و در همین جزیره استفاده می‌شود.



برای آنکه تخمینی از اندازه یک نیروگاه بادی داشته باشیم بهتر است به مقایسه نیروگاه‌ها با توان‌های مختلف پردازیم. به عنوان مثال با داشتن اندازه‌های یک نیروگاه ۳ مگاواتی می‌توان اندازه یک نیروگاه ۱۰۰۰ مگاواتی را ارزیابی کرد. برای جایگزینی یک نیروگاه الکتریکی ۱۰۰۰ مگاواتی با سوخت فسیلی یا ایستگاه هسته‌ای نیازمند ۳۳۳ ماشین ۳ مگاواتی هستیم. در نظر داشته باشید هر توربین ۳ مگاواتی فضای آزادی در حدود ۴۸۰ مترمربع نیاز دارد. اختصاص این حجم فضا آسان نیست. این امر ممکن است سبب برهم کنش مسائل اکولوژیکی و زیبایی شود. در ایالات متحده به دلیل وجود زمین‌های بایر بسیار دستیابی به این امر آسان‌تر از اروپای کوچک کم زمین به نظر می‌رسد. در کشورهای کوچک اروپای غربی زمین کم، گران و برای مصارف دیگر مانند کشاورزی مورد نیاز است. زمین مورد نیاز برای تولید انرژی الکتریکی بادی بسیار بزرگتر از زمین مورد نیاز برای تولید الکتریسیته گرمایی خورشیدی است.

۴-۹-۱. موافقان و مخالفان نیروگاه‌های بادی

کارشناسان مزایا و معایب بسیاری برای نیروگاه‌های بادی اعلام کرده‌اند. از جمله مزایای آن می‌توان رایگان بودن نیروی ورودی، پایان‌ناپذیر بودن انرژی بادی، عدم ایجاد آلودگی، امکان جابجایی توربین‌ها و نیروگاه‌ها، استفاده از دریا و غیره را نام برد. اما در مورد نکات منفی آن نیز می‌توان به خطر سقوط پره‌ها، عدم امکان استفاده از این توربین‌ها در محیط شهری، هزینه بالای ذخیره انرژی الکتریکی تولیدی، ایجاد صدای بلند چرخ‌دنده‌ها، هزینه ایجاد دکل‌های بلند و همچنین راه سازه و غیره برای احداث نیروگاه، تغییرات متناوب شدت جریان باد و غیره اشاره کرد.

۵-۹-۱. تأثیرات زیست‌محیطی

انرژی باد کمترین میزان آسیب زیست‌محیطی را در بین تکنولوژی‌های موجود دارد. هیچ رودخانه‌ای نیاز به سدسازی ندارد، هیچ پسماند هسته‌ای بجا نمی‌ماند و هیچ نفتی جایی ریخته نمی‌شود. به هر حال، نگرانی‌هایی وجود دارد که مناظر جاهایی که توربین بادی آنجا ساخته می‌شود چگونه بوده و یا سروصدای ناشی از آن چگونه است.

۱-۵-۹-۱. تأثیرات در بینش

دستگاه‌های مدرن بالغ بر ۷۰ متر و یا بیشتر از سطح زمین فاصله دارند و باید جایی نصب شوند که باد با سرعت زیادی در آنجا می‌وزد مانند بالای تپه‌ها. این بدان معناست که از مسافت دور دستگاه قابل رؤیت خواهند بود. از آنجا که باد غلظت انرژی پایینی دارد، مزارع باد باید بزرگ بوده تا از هرگونه مزاحمت جلوگیری شود این موضوع منجر به وسعت بالای این مزارع می‌شود که این بدان معناست که این مزارع بسیار وسیع خواهند بود.

۲-۵-۹-۱. مسائل الکترومغناطیسی

به دلیل اندازه و موادی که توربین‌های بادی از آن ساخته می‌شوند و مکانشان (که غالباً بالای تپه است)، آنها می‌توانند با سیگنال‌های رادیو، تلویزیون و رادار مداخله کنند. میزان مداخله به فاکتورهای مختلفی بستگی دارد مانند: اندازه پره‌ها، بلندی و مواد استفاده شده در توربین. طراحی مناسب میزان این مداخلات را کاهش می‌دهد.

۳-۵-۹-۱. تأثیرات اکولوژیکی

در این دنیای پرجمعیت، مکان‌هایی که برای تولید انرژی بادی مورد استفاده قرار می‌گیرند از لحاظ اکولوژیکی حائز اهمیت‌اند. از دست دادن مستقیم زیستگاه به دلیل مزارع بادی ناچیز است (تقریباً سه درصد مناطق). اگرچه خسارت‌های بیشتری در طول ساخت‌وساز ایجاد می‌شود که کوتاه‌مدت‌اند. در طول روزهای اولیه پیشرفت انرژی باد تصور می‌شد که تعداد زیادی از پرندگان به دلیل برخورد از بین خواهند رفت. آزمایشات خلاف این را ثابت کرد و تصادفات ناچیز بودند. در مکان‌های دیگر که توربین‌ها کوچک بوده و فضا برای پرواز وجود دارد برخوردهای کمتری رخ می‌دهند. در جاهای دیگر مانند مناطق ساحلی که تعداد پرندگان بیشتر است برخوردهای بیشتری رخ می‌دهد.

در لنگرگاه بلیس^۱ در بریتانیا در طول سه سال تنها ۳۱ برخورد با توربین‌های ۳۰۰ کیلوواتی گزارش شد. تنها برای مقایسه بهتر است بدانیم که بیش از یک میلیون پرنده به دلیل ترافیک جاده‌ای هر ساله در دانمارک که ۵/۴ میلیون نفر جمعیت دارد می‌میرند.

۴-۵-۹-۱. سروصدا

با کنار گذاشتن نگرانی‌های شخصی زیبایی‌شناختی پیرامون آلودگی‌های بینشی که به دلیل ساخت مزارع باد به وجود می‌آید، نگرانی‌ها پیرامون سروصدای ایجاد شده توسط ایجاد مزارع بادی از دیگر موانع ساخت این نیروگاه‌های بادی است. بنابراین به جزئیات مختلف آلودگی صوتی می‌پردازیم.

توربین‌های بادی غالباً از چرخ‌دنده و ژنراتور سروصدا تولید می‌کنند. با طراحی دقیق‌تر و استفاده از جفت‌های ضد لرزش تا حد زیادی جلوی این سروصدا گرفته می‌شود. سروصداها ی آیرودینامیکی بسیار اساسی بوده و به دلیل تغییرات در سرعت باد در لابه‌لای تیغه‌ها هنگام عبور از برج به وجود می‌آیند. به هر حال، بسامد این صدا پایین بوده و گوش انسان به آن حساس نیست. تداخل لبه‌های تیغه با هوا صدای تیزی را ایجاد می‌کند که بسامدش بالغ بر ۱۰۰۰ هرتز است. همین

1. Blyth Harbour



که تیغه از هوا عبور می‌کند سبب برش هوا شده و صدا در طبیعت پخش می‌شود که بسامدش بین ۷۵۰ تا ۲۰۰۰ هرتز است. به دلایل مختلف صدای آیرودینامیک به‌طور منظم در نوسان است و همین امر باعث اذیت‌کننده بودن آن می‌شود.

میزان صدای آیرودینامیک را می‌توان به‌وسیله کم کردن سرعت چرخش یا کاهش زاویه تیغه‌ها کم کرد که هر دوی این کارها سبب کاهش نیروی به‌دست آمده توسط دستگاه می‌شود. متغیرها یا دستگاه‌های دوسرعه می‌توانند زمانی که سرعت باد پایین است یا صدای پس‌زمینه کم است این کار را انجام دهند که از مزایای چنین دستگاه‌هایی است.

نیروی صدای هر وسیله برمی‌گردد به میزان انرژی آزاد شده به‌صورت صدا که توسط این دستگاه در هر ثانیه آزاد می‌شود. این انرژی در فضای پیرامون دستگاه آزاد شده و هرچقدر ما از دستگاه دور می‌شویم بلندای آن به‌دلیل اینکه در فضای بیشتری پخش می‌شود کمتر می‌شود. برای هر نقطه بالای سطح زمین یا بالای سطح جذب صدا، صدا خود را در محدوده‌ای پخش می‌کند که آن محدوده در چهار جهت در حال افزایش است و هرقدر که از این منبع دور می‌شویم این صدا کمتر و کمتر می‌شود. بنابراین، مشکل صدای توربین تنها در نزدیکی این صدا یک مشکل محسوب می‌شود. اگرچه مناطق روستایی که این دستگاه در آن نصب می‌شود در شب بسیار ساکت بوده و امکان به هم ریختن آرامش این مناطق نیز وجود دارد.

۱-۱۰. انرژی خورشیدی

۱-۱۰-۱. تابش از خورشید

خورشید منظومه ما یک ستاره نسبتاً ساده است که ستاره‌شناسان آن را جی تایپ G-type «ستاره دنباله‌دار اصلی» می‌گویند. این ستاره در یک منظومه متوسط به‌نام منظومه شمسی است که پر از گاز و گردوغبار بوده و قطری برابر ۱۰۰۰۰۰ سال نوری دارد.

خورشید توده بزرگی از گازهای سوزان است که اساساً هیدروژن و هلیوم بوده و قطر آن $1/4$ میلیون کیلومتر است. در هسته مرکزی خود که حدود یک‌چهارم قطر آن را اشغال کرده گرمای آن به ۲۰ میلیون کلوین می‌رسد. در این منطقه پلاسمایی، هیدروژن‌های اتمی شکل‌دهنده به آزادسازی انرژی می‌پردازند.

بیرون از جو زمین جریان تابشی یا نیروی خورشید معادل $1/36$ کیلووات در مترمربع است که میزان ثابت تابش نامیده می‌شود. در سطح دریا با درجه صفر، توده هوایی که انرژی تابشی از میان آن عبور می‌کند میزان متوسط نیرو را به ۱ کیلووات در مترمربع کاهش می‌دهد. در طول

موج‌های مختلف، انرژی تابشی دریافت شده از خورشید تا به سطح زمین برسد به دلیل جذب شدن به وسیله بخار آب یا گاز اتمسفر مانند اکسیژن یا دی‌اکسیدکربن کاهش می‌یابد.

شدت تابش در سطح بستگی به عوامل زیر دارد:

(الف) غیرمستقیم بودن زاویه بین سطح و اشعه تابش.

(ب) طول توده هوا که نور تابشی باید از میان آن عبور کند.

هر دو عامل بالا بستگی به درجه خورشید نسبت به سطح زمین دارد. در اروپای شمالی بیشترین درجه در اواسط زمستان است که به ۱۵ درجه می‌رسد.

در بریتانیا متوسط سالیانه انرژی تابشی در سطح زمین ۱۰۰ وات بر مترمربع است. در ماه‌های تابستان این میزان به ۱ کیلووات بر مترمربع می‌رسد، اما تنها به مدت ۱ ساعت طول می‌کشد.

باید اشاره کرد که همه تابش خورشید به سطح زمین نمی‌رسد. بلکه بخشی به وسیله ابرها منعکس شده و به فضا باز می‌گردد، درحالی که برخی از عناصر توسط گردوغبار جو و ابرهای گاز جذب می‌شود. وجود مولکول گاز و گردوغبار در جو سبب پراکندگی و انحراف اشعه‌های خورشید می‌شود. هر برخورد سبب می‌شود که مقداری از انرژی آن از دست برود و طول موج اشعه افزایش یابد. مجموع تأثیرات گوناگون این انعکاس، پخش و جذب به عنوان توزیع عناصر تابش شناخته می‌شود. میزان نسبی توزیع تابش در قسمت‌های مختلف جهان در زمان مختلف سال متفاوت است. اما به صورت میانگین این عدد در واحد سطح ۹۰۰ کیلووات بر مترمربع است. این مقدار انرژی بسیار بالایی است که پتانسیل بالایی دارد.

۲-۱۰-۱. تفاوت فصلی تابش خورشیدی

همین که زمین در ۳۶۵ روز و ۶ ساعت به دور خورشید می‌چرخد، در هر روز یک دور به حول محور خود می‌چرخد. محور چرخش ۲۳/۴۴ درجه از قمر است. به همین دلیل خطوط طولی رأس سرطان با مقیاس ۲۳/۴۴ درجه از خط استواست. تابش خورشیدی مناطق استوایی سطح زمین را در مقایسه با مناطق قطبی تحت تأثیر بیشتری قرار می‌دهد. به همین دلیل است جریان خورشید در سطح زمین وابسته بر عرض جغرافیایی است. میانگین تابش سالیانه بین مناطق سطح زمین تقسیم می‌شود. کاملاً روشن است که مناطق دارای میانگین سالیانه تابش شدید با مناطق کویری همخوانی دارد جایی که تابش به سطح زمین بالاست.

میانگین ۱۰۰ وات بر مترمربع برای اروپای شمالی و جزایر بریتانیاست. همچنین شامل مناطق شمالی کشور کانادا و مناطق سیبری روسیه می‌باشد. درجه هوای زمستان در بریتانیا به دلیل



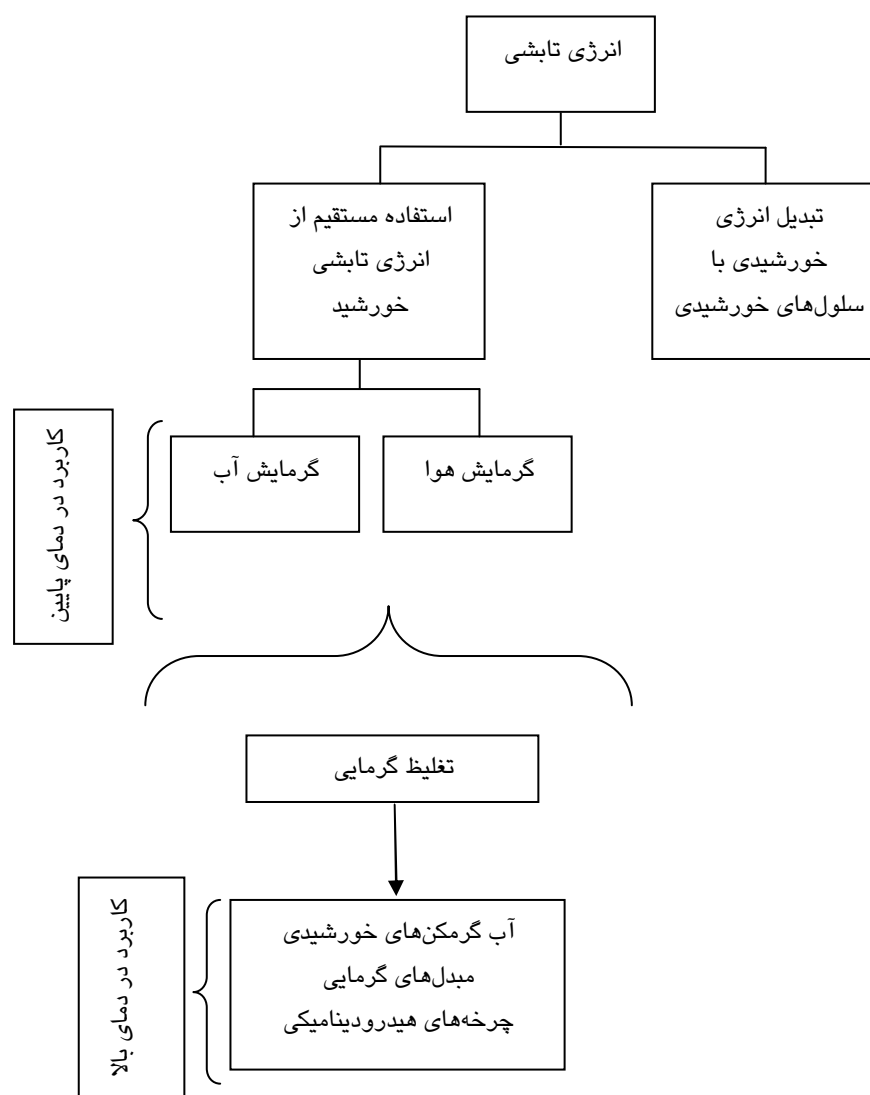
تأثیرات ملایم جریان اقیانوس به خصوص گلف استریم بسیار ملایم‌تر از شمال کانادا و روسیه است. برای بریتانیا میانگین سالیانه انرژی خورشید دریافت شده ۱۰۰ وات بر مترمربع با توزیع ماهیانه که در ژوئن به اوج می‌رسد است. در مقایسه، مصر و سودان در شمال آفریقا ۳۰۰ وات بر مترمربع دریافت می‌کند و توزیع ماه به ماه بسیار یکنواخت است.

در بریتانیا تابش خورشید در تابستان قوی‌تر از زمانی است که نیاز به انرژی هم در بخش خانگی و هم در بخش صنعتی پایین می‌باشد. ممکن است بگوییم که در بریتانیا نور تابشی خورشید با نیاز به الکتریسیته همخوان نیست. باید بگوییم که کشورهای دیگری وجود دارند که در آنها سطح انرژی تابشی با میزان نیاز به الکتریسیته همخوانی دارد. برای مثال در جنوب ایالات متحده آمریکا میزان نیاز به الکتریسیته در تابستان به دلیل استفاده از کولر و تجهیزات یخچالی بسیار بیشتر از زمستان است. همین موضوع در مورد نواحی مرکزی و جنوبی ایران نیز صادق است.

۳-۱۰-۱. طبقه‌بندی مجموعه انرژی خورشیدی

سیستم‌های تولید انرژی خورشیدی به صورت کلی به سه دسته طبقه‌بندی می‌شوند. این طبقه‌بندی‌ها شامل:

- الف) تبدیل مستقیم انرژی خورشیدی به الکتریسیته با استفاده از سلول فتوولتائیک.
- ب) گرم کردن مستقیم آب یا هوا برای بازخورد گرمایی زیر ۱۵۰ درجه سانتیگراد. این تکنولوژی گرمایی بیشتر برای گرم کردن ساختمان یا آب گرم مورد نیاز خانگی مورد استفاده قرار می‌گیرد.
- ج) سیستم‌های گرمایی متمرکز برای تولید درجه حرارت بالا (بالا تر از ۱۵۰ درجه سانتیگراد) انرژی گرمایی به عنوان مثال سیستم‌های ترمودینامیک.



۴-۱۰-۱. آب گرم‌کن‌های خورشیدی (خانگی)

بقایایی از رُم باستان در بسیاری از کشورهای مدیترانه‌ای و اروپا یافت شده است که به ۲۰۰۰ سال قبل می‌رسد. این بقایا نشان می‌دهد که رومیان باستان از آب گرم شده خورشیدی استفاده می‌کردند. کانال‌های باز آب خانه‌ها را سیاه کرده تا با افزایش انرژی خورشید آب گرم‌تری برای حمام مهیا شود. حدود یک‌چهارم انرژی مصرف شده در آمریکا و کشورهای جوامع اروپایی در حال حاضر برای اهداف گرمایشی و سرمایشی می‌باشد. بسیاری از این انرژی برای گرم کردن ساختمان یا گرم کردن آب برای مصارف خانگی می‌باشد. رایج‌ترین گرم‌کننده‌های خانگی خورشیدی از سیستم گلخانه‌ای استفاده می‌کنند.



۱-۴-۱۰-۱. تأثیر گلخانه‌ای

زمانی که اشعه خورشید از میان شیشه عبور می‌کند، برخورد بین فوتون‌های تابش الکترومغناطیسی و برخی از مولکول‌های شیشه سبب شده تا مقداری از انرژی به‌صورت گرما در شیشه پخش شده و جذب شود. کاهش انرژی به‌دلیل تابش سبب افزایش طول موج می‌شود. زمانی که این طول موج بالا به محفظه گلخانه وارد می‌شود، مقداری از آن منعکس یا شکسته می‌شود. هریک از این تغییرات در مسیر تابش سبب از دست رفتن انرژی و افزایش طول موج می‌شود. انعکاس، پخش شدن و جذب زیادی صورت می‌گیرد تا زمانی که تمام انرژی آن جذب می‌شود. تأثیر کلی آن افزایش دماست تا زمانی که انرژی دریافت شده با گرمای از دست رفته به‌دلیل جابجایی، رسانایی و تابش دوباره در تعادل باشد. در شب، زمانی که نور تابشی فروکش می‌کند، میزان بالایی از انرژی گرمایی گلخانه‌ای با تابش دوباره به سمت بیرون یا کاهش دما از دست می‌رود.

بسیاری از باغبان‌ها از یک محفظه شیشه‌ای استفاده می‌کنند، که گلخانه نامیده می‌شود، زیرا دارای پوشش سبزی از گیاهان درحال رشد است. برخی از ساختارهای گلخانه‌ای به‌عنوان نگهدارنده‌هایی ساخته می‌شوند و دیوار مشترکی با خانه دارند. برخی دیگر از گلخانه‌ها محفظه‌های شیشه‌ای بسته‌ای هستند که از لحاظ فیزیکی مستقل از ساختمان‌های دیگر می‌باشند. تجربه جالبی است که اگر در میان یک گلخانه در زمستان زمانی که بیرون یخبندان است قدم بزنیم، حتی بدون هیچ‌گونه وسیله گرمایشی دمای درون گلخانه به‌دلیل تابش خورشید بالای درجه یخبندان و گرم‌تر از بیرون خواهد بود. در طول تابستان گلخانه‌ها نور خورشید بالایی را دریافت می‌کنند و به‌منظور جلوگیری از دمای بالا باید تهویه هوا صورت گیرد یا برای گلخانه سایه ایجاد شود.

۲-۴-۱۰-۱. کالکتورهای^۱ (جذب‌کننده‌های) خورشیدی صفحه تخت

بسیاری از کالکتورهای آب گرم خورشیدی مورد استفاده در خانه‌ها همین کالکتورهای خورشیدی صفحه تخت است. واژه «کالکتورهای صفحه تخت» نسبتاً گمراه‌کننده است و انواع مختلفی از شکل‌های هندسی را شامل می‌شود (که خیلی از آنها تخت نیستند) و دارای مایع‌های گرم مختلف و روش‌های مختلف انتقال گرما هستند. یک کالکتور درواقع یک صفحه فلزی است که شکاف داده شده است تا مایع از میان آن عبور کند. یک ساختار رایج آن بسیار شبیه به رادیاتور گرمایی مرکزی در سیستم شوفاژخانه است. سطح این کالکتور خورشیدی در معرض تابش قرار می‌گیرد و برای جذب حداکثری تابش به رنگ سیاه است. این کالکتور معمولاً در درون محفظه‌ای قرار دارد که دارای روکش پلاستیکی یا شیشه‌ای به‌منظور حفظ گرما در درون خود است. همان‌طور که در بخش قبل توضیح داده شد، تأثیر گلخانه‌ای سبب می‌شود تا دمای بالا از محفظه کالکتور ساطع شود. گرما از

سطح فلزی کالکتور به منبع انرژی از طریق پمپاژ آب به بیرون انتقال می‌یابد. در یک روز گرم تابستان این کالکتور چنان گرم می‌شود که توسط دست قابل لمس نیست. کالکتورها معمولاً بر روی سقف نصب می‌شوند و در زاویه‌ای قرار می‌گیرند که با تابش زاویه ۹۰ درجه را تشکیل دهد. پوشش‌های مختلفی برای کالکتورهای خورشیدی وجود دارد تا بتواند جذب آن را افزایش و بازتابش آن را کاهش دهد. حتی بدون پوشش شیشه‌ای میزان فلزاتی مانند بریلیم می‌تواند عملکرد کالکتور را بهبود بخشد. استفاده از این پوشش سبب گسترش تأثیرات گلخانه‌ای می‌شود و در مقابل از دست دادن گرما سبب گرما دادن می‌شود.

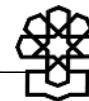
۵-۱۰-۱. سلول‌های فتوولتائیک خورشیدی

۱-۱۰-۵-۱. ویژگی‌های ابتدایی سلول‌ها و سیستم‌های خورشیدی

انرژی خورشیدی می‌تواند به‌طور مستقیم، بدون هرگونه اعمال واسطه، با استفاده از سلول‌های فتوولتائیک خورشیدی به انرژی الکتریکی تبدیل شود. قطر این سلول‌ها عموماً با چند تا چند ده سانتیمتر می‌رسد. مزایای استفاده از تولید فتوولتائیک عبارتند از:

- (الف) قطعه متحرکی وجود ندارد در نتیجه نیاز به مراقبت کمی دارد.
- (ب) منبع انرژی تجدیدپذیر نامحدود (نسبت به طول عمر انسان) و بدون آلودگی را به‌کار می‌گیرد.
- (ج) سلول‌ها قابل اطمینان و ماندگار هستند؛ بدون هیچ‌گونه فرآورده زائد خطرناک.
- (د) هیچ‌گونه خطر قابل تشخیص برای سلامتی وجود ندارد.
- (هـ) سلول‌ها از سیلیکون ساخته شده‌اند که از فراوان‌ترین و ارزان‌ترین مواد موجود در کره زمین است.
- (و) سلول‌ها می‌توانند در مکان‌های دور و غیرقابل دسترس استفاده شوند؛ مثل یک سفینه فضایی در مدار زمین.
- (ز) نسبت توان به وزن آنها بالاست که در پروژه‌های کیهانی/ فضایی مورد استفاده قرار می‌گیرد.
- (ی) در کارخانه‌ای پیشرفته و توسعه‌یافته ساخته شده‌اند بنابراین می‌توان انتظار بهبود پیوسته در کارکرد را داشت.

با این لیست مزایای بالا می‌توان دریافت که زمان و تلاش و کوشش بسیار زیادی صرف توسعه سلول‌های خورشیدی شده و می‌شود. اگر مبدل‌های فتوولتائیک خورشیدی، ارزان‌تر در اختیار بود، صحنه تولید انرژی برای مصرف عمده را به کلی تغییر می‌داد. متأسفانه آنها هنوز برای



استفاده عمده گران هستند، اما با افزایش قیمت نفت و کاهش قیمت تولید این صفحات روز به روز به امکان استفاده گسترده از این صنعت اضافه می‌شود.

برای بررسی هزینه سلول‌های خورشیدی اصطلاح «حداکثر (پیک) وات»^۱ استفاده می‌شود. این بدان معناست که وقتی در منطقه‌ای ثابت تابش خورشید ۱۰۰۰ وات بر مترمربع است و بازده ۱۰ درصد است، ۱ مترمربع از ردیف سلول‌ها حداکثر ۱۰۰ پیک وات تولید خواهد کرد.

۲-۵-۱۰-۱. هزینه الکتریسته فتوولتائیک خورشیدی

در سال ۱۹۷۳ حداکثر هزینه به ازای هر وات حدود ۳۰۰ دلار بود. به دلیل افزایش وسیع تحقیقات این هزینه حداکثر تا ۱۵ دلار به ازای هر وات کاهش یافت و در سال ۱۹۸۳ به حداکثر ۱۰ دلار در هر وات سقوط کرد. در اواخر دهه ۸۰ میلادی نیز این هزینه حداکثر به ۲ تا ۳ دلار در هر وات رسید. در سال ۲۰۰۰ برای اولین بار برق تولیدی نیروگاه‌های فتوولتائیک در جهان از مرز ۱ گیگاوات (۱۰۰۰ مگاوات) گذشت. هزینه تولید برق از این شیوه در سال‌های اخیر به شدت کاهش یافته و در محل‌های با پتانسیل بالا قابل رقابت با دیگر منابع تولید الکتریسته است. در مورد هزینه تولید برق از این شیوه در فصل سوم بحث شده است.

۳-۵-۱۰-۱. طبیعت فیزیکی مواد نیمه‌هادی (نیمه‌رسانا)

موادی که معمولاً به عنوان نیمه‌رسانا استفاده می‌شوند، مانند سیلیکون و ژرمانیم، در تناوب ۴ جدول تناوبی عناصر پیدا می‌شوند. لایه خارجی الکترون‌ها، که گاهی لایه ظرفیت (والانس) نامیده می‌شود، در مدل اتمی بور از ۴ الکترون تشکیل می‌شود که اجازه می‌دهد که بلور خالصی از ماده پیوندهای قوی کووالانسی تشکیل دهد. هسته‌ها از پروتون‌ها و نوترون‌ها تشکیل می‌شوند که به جرم اتم مربوطه اضافه می‌کنند. لایه‌های کوانتومی الکترون‌ها هر هسته را محاصره می‌کنند تا مجموع تعداد الکترون‌ها برابر عدد اتمی شود و مکان را در جدول تناوبی عناصر مشخص کند. پیوند کووالانسی در شبکه‌ای از یک بلور خالص متراکم است به همین دلیل به طور نسبی، انرژی بیشتری برای جدا کردن یک الکترون از پیوند و در دسترس کردن آن برای حمل انرژی نیاز است. مواد نیمه‌رسانای خالص، چنان مقاومت بالایی دارند که در دمای اتاق نارسانا هستند. عبور یک جریان الکتریکی از یک بلور خالص سیلیکون یا ژرمانیم در دمای اتاق، باعث نشت کمی جریان الکتریکی می‌شود. برای مثال، یک اختلاف پتانسیل ۱۰۰ ولتی در ۱ مترمربع بلور سیلیکونی باعث نشت حدود ۴ میلی آمپر از جریان الکتریکی می‌شود. برای تبدیل ماده نیمه‌رسانا خالص از یک مبدل با حساسیت نوری اما کمبود فاحش الکتریسته به فرمی مناسب برای استفاده در ترانزیستورها یا سلول‌های فتوولتائیک، که قابلیت عبور دادن جریان الکتریکی خیلی بیشتری را دارا هستند، لازم

1. Peak watt

است تا بازده تبدیل بیشتر شود. این کار با افزایش انرژی الکترون‌های لایه خارجی امکانپذیر است. چنین تغییری با فرآیند صنعتی پیچیده‌ای بنام «تغلیظ» امکانپذیر است که در آن سایر مواد، واقع در ستون ۳ و ۵ جدول عناصر، با نیمه‌رسانای خالص ترکیب می‌شوند. این کشف مهم بنیادین، برای اولین بار در آزمایشگاه شرکت تلفن «بل» در نیوجرسی آمریکا در دهه ۱۹۵۰ میلادی استفاده شد.

۴-۵-۱۰-۱. کاربردهای سلول‌های فتوولتائیک

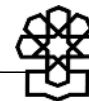
بخش صنعت انرژی استفاده عمده سلول‌های فتوولتائیک سیلیکونی به‌عنوان نورسنج یا «چشم الکتریکی» در دوربین‌هاست.

همان‌طور که اشاره شد از صفحات سیلیکونی برای تولید الکتریسیته استفاده می‌شود. درحال حاضر در مناطق دورافتاده که دسترسی و ایجاد شبکه‌های انتقال برق مشکل و پرهزینه است، استفاده از این صفحات کمک شایانی به تولید انرژی می‌باشد. به‌صورت میانگین در حدود ۱ مترمربع از این صفحات قابلیت ایجاد انرژی لازم برای استفاده در سیستم‌های رادیویی و یا ایجاد یک روشنایی محدود را دارد. با حدود ۲ مترمربع از این سلول‌ها برق کافی برای کار کردن یک پمپ کوچک آب به‌منظور مصارف آبیاری در دسترس خواهد بود. تکنولوژی‌های جدیدتر امکان تولید برق بیشتری را فراهم کرده‌اند.

در شماری از مناطق دنیا ردیف‌های سلول‌های خورشیدی برای روشن کردن خیابان‌ها استفاده می‌شوند. در روز انرژی حاصله از خورشید در باتری ذخیره می‌شود. پس از تاریک شدن، باتری متصل شده برق مورد نیاز برای روشن کردن چراغ را فراهم می‌کند و به‌طور خودکار بعد از طلوع خورشید خاموش می‌شود.

ردیف‌های بزرگ در بعضی مورد‌های تجاری استفاده شده‌اند. به‌عنوان مثال یک سیستم ۱۰۰ کیلوواتی در دبیرستان Beverley در آمریکا از این سیستم برای تأمین برق استفاده کرده است. این مدرسه از ۳۲۰۰ صفحه استفاده می‌کند که هرکدام حاوی ۳۶ سلول خورشیدی است. سیستم ۱۰ درصد از برق مورد نیاز این مجموعه را تأمین می‌کند. به‌نظر می‌رسد که هیچ محدودیت الکتریکی از اندازه ردیف وجود ندارد. محدودیت‌ها شاید به‌وسیله ساختار، فضای موجود و وزن بنا ایجاد شود.

نیروگاه‌های برق فتوولتائیک خورشیدی نسل جدید نیروگاه‌هاست. آنها شامل ردیفی از سلول‌های خورشیدی می‌شوند - معمولاً شامل یک نوع دستگاه متمرکزکننده، یک کارگاه ذخیره باتری که توانایی ذخیره بیشتر یا همه انرژی خورشیدی را داشته باشد و همچنین یک سیستم کنترلی مناسب اجزای این نیروگاه را تشکیل می‌دهد. این نیروگاه‌ها تنها در مناطقی که تابش شدیدی



وجود دارد دیده می‌شوند، مثل آفریقای شمالی، خاورمیانه، کشورهای که دارای آب و هوای مدیترانه‌ای هستند مثل قسمت‌های جنوبی آمریکا و مکزیک. یک سیستم ولتائیک خورشیدی ۳۵۰ کیلوواتی در عمل می‌تواند برق دو روستا را در بیرون از ریاض، پایتخت عربستان، تأمین کند.

۱-۱۱. انرژی زیستی و انرژی شیمیایی

بایومس و بیوسوخت

هر نوع ماده گیاهی یا جانوری که می‌توان آن را به انرژی تبدیل کرد بایومس نامیده می‌شود که آن شامل درختان و بوته‌ها، دانه‌ها و چمن، خزه، گیاهان آبی، پسماندهای جنگلی و کشاورزی به‌علاوه هرگونه ضایعات انسانی، حیوانی و گیاهی است. هرگاه این مواد برای تولید انرژی به‌کار رود بیوسوخت نامیده می‌شود. اشکال مختلف بیوسوخت در حالت‌های جامد، مایع و گازی وجود دارند. برآورد بایومس جامد ذخیره شده در جنگل‌های دنیا در سال ۱۹۷۹، 1.7×10^{12} بود. در آن زمان این رقم قابل مقایسه با ذخایر طبیعی نفت و گاز اثبات شده بود. عدد بایومس مشابه حدود ۵۰ برابر ارزش مصرف عمده انرژی جهان در سال ۲۰۰۰ است. اگر ارزش بایومس چمنزارها و دانه‌ها را هم شامل شوند (با وجود اینکه اینها اساساً برای تولید مواد غذایی - انرژی غیرمستقیم - استفاده می‌شوند تا منابع سوخت) رقم بایومس جامد به ۲۰۰ برابر مصرف جهانی انرژی در سال ۲۰۰۰ می‌رسد.

منابع اصلی مواد خام که بیوسوخت‌ها را تشکیل می‌دهند عبارتند از:

۱. پوشش گیاهی طبیعی،
۲. کشت درخت انرژی،
۳. دانه‌های انرژی ویژه،
۴. ضایعات،
۵. بایومس با پایه آبی.

فصل دوم - بررسی ظرفیت و تولید انرژی جهان

همان‌طور که اشاره شد منابع انرژی را می‌توان به دو گروه تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر تقسیم کرد. منابع تجدیدناپذیر عموماً همان منابع فسیلی هستند. این منابع به‌صورت کلی عبارتند از: نفت، گاز و زغال‌سنگ. البته انرژی هسته‌ای از نوع شکافت هسته نیز به‌دلیل منابع محدود اورانیم نیز جزء همین گروه محسوب می‌شود. منابع تجدیدپذیر یا همان انرژی‌های نو عبارتند از: انرژی‌های آبی، بادی،

خورشیدی، زمین گرمایی، انرژی زیستی. در این فصل به پتانسیل طبیعت برای تأمین این نوع انرژی‌ها خواهیم پرداخت. همچنین در ادامه به وضعیت تولید این منابع در کشورهای مختلف اشاره خواهیم کرد.

پیش از بررسی ظرفیت قابل برداشت منابع انرژی باید به چند نکته اشاره کرد. ابتدا آنکه بشر امکان استفاده از تمام ظرفیت انرژی‌های موجود را ندارد. به عنوان مثال بشر تنها امکان دستیابی به ۵ تا ۳۰ درصد از منابع نفتی را دارد، زیرا محدودیت‌های تکنولوژیکی و اقتصادی مانع دستیابی بیشتر به این منابع می‌شود. محدودیت‌های تکنولوژیکی از آن جهت است که با تکنولوژی موجود بیشتر از این حجم نمی‌توان از ذخایر موجود نفتی برداشت کرد. محدودیت‌های اقتصادی از آن جهت که حتی اگر با تکنولوژی‌های پیشرفته‌تر به توان برداشت بیشتری از مخزن نفتی داشت اما هزینه تولید آنچنان افزایش می‌یابد که دیگر برداشت از این منابع اقتصادی نخواهد بود. به همین دلیل عموماً در مورد منابع فسیلی دو عدد متفاوت برای حجم ذخایر اعلام می‌شود. یکی حجم در جای ذخایر است که بیانگر میزان ذخیره در مخزن است و دیگری که عموماً بسیار کمتر است عدد حجم قابل برداشت از مخزن می‌باشد.

این موضوع در مورد منابع تجدیدپذیر نیز صادق است. به عنوان مثال در مورد انرژی خورشیدی همان‌طور که در فصل اول اشاره شد پتانسیل بسیار بالایی در این انرژی نهفته است، اما محدودیت‌های تکنولوژیکی، زیست‌محیطی، اقتصادی و... اجازه استفاده از این منبع را به بشر نمی‌دهد. با توجه به مشکلات پیچیده تکنولوژیکی و هزینه بالای استفاده از منابع انرژی‌های نو توان بهره‌برداری بشر از این منابع در مقایسه با انرژی‌های فسیلی فوق‌العاده کمتر است.

۲-۱. بررسی حجم منابع فسیلی

۲-۱-۱. نفت

در این بخش به بررسی منابع نفتی کشورهای مختلف و جهان می‌پردازیم. همان‌طور که اشاره شد منظور از منابع نفتی همان منابع قابل استحصال توسط بشر است و نه میزان درجای منبع نفتی. جدول ۲-۱ منابع نفتی موجود در کشورهای مختلف را نشان می‌دهد. همه جداول این فصل به جز جدول ۲-۷ از گزارش سالیانه شرکت بی پی، چاپ شده در سال ۲۰۱۳ استخراج شده است.



جدول ۱-۲. مجموع ذخایر قابل برداشت جهان (هزار میلیون بشکه)

نسبت R/P*	درصد از کل	در انتهای ۲۰۱۲	در انتهای ۲۰۱۱	در انتهای ۲۰۰۲	در انتهای ۱۹۹۲	هزار میلیون بشکه
۱۰/۷	۲/۱	۳۵/۰	۳۵/۰	۳۰/۷	۳۱/۲	آمریکا
*	۱۰/۴	۱۷۳/۹	۱۷۴/۶	۱۸۰/۴	۳۹/۶	کانادا
۱۰/۷	۰/۷	۱۱/۴	۱۱/۴	۱۷/۲	۵۱/۲	مکزیک
۳۸۷	۱۳/۲	۲۲۰/۲	۲۲۱/۰	۲۲۸/۳	۱۲۲/۱	مجموع آمریکای شمالی
۱۰/۲	۰/۱	۲/۵	۲/۵	۲/۸	۲/۰	آرژانتین
۱۹/۵	۰/۹	۱۵/۳	۱۵/۰	۹/۸	۵/۰	برزیل
۶/۴	۰/۱	۲/۲	۲/۰	۱/۶	۳/۲	کلمبیا
۴۴/۶	۰/۵	۸/۲	۷/۲	۵/۱	۳/۲	اکوادور
۳۱/۵	۰/۱	۱/۲	۱/۲	۱/۰	۰/۸	پرو
۱۸/۸	۰	۰/۸	۰/۸	۱/۱	۰/۵	ترینیداد و توباگو
*	۱۷/۸	۲۹۷/۶	۲۹۷/۶	۷۷/۳	۶۳/۳	ونزوئلا
۹/۷	۰	۰/۵	۰/۵	۱/۶	۰/۶	بقیه آمریکای مرکزی جنوبی
*	۱۹/۷	۳۲۸/۴	۳۲۶/۹	۱۰۰/۳	۷۸/۸	مجموع مرکز و جنوب آمریکا
۲۱/۹	۰/۴	۷/۰	۷/۰	۷/۰	-	آذربایجان
۹/۷	۰	۰/۷	۰/۸	۱/۳	۰/۷	دانمارک
۳۳/۷	۰/۱	۱/۴	۱/۴	۰/۸	۰/۶	ایتالیا
۴۷/۴	۱/۸	۳۰/۰	۳۰/۰	۵/۴	-	قزاقستان
۱۰/۷	۰/۴	۷/۵	۶/۹	۱۰/۴	۹/۷	نروژ
۱۹/۱	۰	۰/۶	۰/۶	۰/۵	۱/۲	رومانی
۲۲/۴	۵/۲	۸۷/۲	۸۷/۱	۷۶/۱	-	روسیه
۷/۴	۰	۰/۶	۰/۶	۰/۵	-	ترکمنستان
۸/۸	۰/۲	۳/۱	۳/۱	۴/۵	۴/۶	انگلستان
۲۴/۰	۰	۰/۶	۰/۶	۰/۶	-	ازبکستان
۱۴/۸	۰/۱	۲/۱	۲/۲	۲/۲	۶۱/۳	بقیه اروپا و اوراسیا
۲۲/۴	۸/۴	۱۴۰/۸	۱۴۰/۳	۱۰۹/۳	۷۸/۳	مجموع اروپا و اوراسیا
*	۹/۴	۱۵۷/۰	۱۵۴/۶	۱۳۰/۷	۹۲/۹	ایران
*	۹/۰	۱۵۰/۰	۱۴۳/۱	۱۱۵/۰	۱۰۰/۰	عراق
۸۸/۷	۶/۱	۱۰۱/۵	۱۰۱/۵	۹۶/۵	۹۶/۵	کویت
۱۶/۳	۰/۳	۵/۵	۵/۵	۵/۷	۴/۷	عمان
۳۳/۲	۱/۴	۲۳/۹	۲۳/۹	۲۷/۶	۳/۱	قطر
۶۳/۰	۱۵/۹	۲۶۵/۹	۲۶۵/۴	۲۶۲/۸	۲۶۱/۲	عربستان سعودی
۴۱/۷	۰/۱	۲/۵	۲/۵	۲/۳	۳/۰	سوریه
۷۹/۱	۵/۹	۹۷/۸	۹۷/۸	۹۷/۸	۹۸/۱	امارات
۴۵/۴	۰/۲	۳/۰	۳/۰	۲/۹	۲/۰	یمن
۸/۴	۰	۰/۶	۰/۷	۰/۱	۰/۱	بقیه خاورمیانه
۷۸/۱	۴۸/۴	۸۰۷/۷	۷۹۷/۹	۷۴۱/۳	۶۶۱/۶	مجموع خاورمیانه
۲۰/۰	۰/۷	۱۲/۲	۱۲/۲	۱۱/۳	۹/۲	الجزیره
۱۹/۴	۰/۸	۱۲/۷	۱۰/۵	۸/۹	۱/۳	آنگولا

نسبت R/P*	درصد از کل	در انتهای ۲۰۱۲	در انتهای ۲۰۱۱	در انتهای ۲۰۰۲	در انتهای ۱۹۹۲	هزار میلیون بشکه
۴۰/۷	۰/۱	۱/۵	۱/۵	۰/۹	—	چاد
۱۴/۸	۰/۱	۱/۶	۱/۶	۱/۵	۰/۷	جمهوری کنگو
۱۶/۱	۰/۳	۴/۳	۴/۳	۳/۵	۳/۴	مصر
۱۶/۵	۰/۱	۱/۷	۱/۷	۱/۱	۰/۳	گوینیا
۲۲/۳	۰/۱	۲/۰	۲/۰	۲/۴	۰/۸	گابن
۸۶/۹	۲/۹	۴۸/۰	۴۸/۰	۳۶/۰	۲۲/۸	لیبیا
۴۲/۱	۲/۲	۳۷/۲	۳۷/۲	۳۴/۳	۲۱/۰	نیجریه
*	۰/۲	۳/۵	—	—	—	سودان جنوبی
۵۰/۰	۰/۱	۱/۵	۵/۰	۰/۶	۰/۳	سودان
۱۷/۹	۰	۰/۴	۰/۴	۰/۵	۰/۵	تونس
۴۳/۰	۰/۲	۳/۷	۲/۲	۰/۶	۰/۸	بقیه آمریکا
۳۷/۷	۷/۸	۱۳۰/۳	۱۲۶/۶	۱۰۱/۶	۶۱/۱	مجموع آفریقا
۲۳/۴	۰/۲	۳/۹	۳/۹	۴/۶	۳/۲	استرالیا
۱۹/۰	۰/۱	۱/۱	۱/۱	۱/۱	۱/۱	برونئی
۱۱/۴	۱/۰	۱۷/۳	۱۷/۳	۱۵/۵	۱۵/۲	چین
۱۷/۵	۰/۳	۵/۷	۵/۷	۵/۶	۵/۹	هند
۱۱/۱	۰/۲	۳/۷	۳/۷	۴/۷	۵/۶	اندونزی
۱۵/۶	۰/۲	۳/۷	۳/۷	۴/۵	۵/۱	مالزی
۲/۷	۰	۰/۴	۰/۴	۰/۷	۰/۲	تایلند
۳۴/۵	۰/۳	۴/۴	۴/۴	۲/۸	۰/۳	ویتنام
۱۰/۵	۰/۱	۱/۱	۱/۱	۱/۱	۰/۹	بقیه آسیا و اقیانوسیه
۱۳/۶	۲/۵	۴۱/۵	۴۱/۴	۴۰/۶	۳۷/۵	مجموع آسیا و اقیانوسیه
۵۲/۹	۱۰۰/۰	۱۶۶۸/۹	۱۶۵۴/۱	۱۳۲۱/۵	۱۰۳۹/۳	مجموع جهان

* این شاخص نسبت منابع به تولید را نشان می‌دهد.

همان‌طور که از جدول ۱-۲ مشهود است مجموع ذخایر نفت قابل برداشت جهان در سال ۲۰۱۲

میزان ۱۶۶۸/۹ میلیارد بشکه بوده است.

تولید نفت در جهان نیز طی سال‌های گذشته افزایش یافته است. جدول ۲-۲ تولید نفت توسط

کشورهای مختلف را نشان می‌دهد.



جدول ۲-۲. تولید نفت جهان از سال ۲۰۰۹ تا سال ۲۰۱۲ (هزار بشکه در روز)

تولید نفت جهان از سال ۲۰۰۹ تا سال ۲۰۱۲	تغییرات ۲۰۱۲ نسبت به ۲۰۱۱ (درصد)	تولید نفت جهان از سال ۲۰۰۹ تا سال ۲۰۱۲				هزار بشکه روزانه
		۲۰۱۲	۲۰۱۱	۲۰۱۰	۲۰۰۹	
۹/۶	۱۳/۹	۸۹۰۵	۷۸۶۸	۷۵۵۲	۷۲۶۳	آمریکا
۴/۴	۶/۸	۳۷۴۱	۳۵۲۶	۳۳۳۲	۳۲۰۲	کانادا
۳/۵	-۰/۷	۲۹۱۱	۲۹۴۰	۲۹۵۹	۲۹۷۸	مکزیک
۱۷/۵	۸/۹	۱۵۵۵۷	۱۴۳۳۵	۱۳۸۴۳	۱۳۴۴۴	مجموع آمریکای شمالی
۰/۸	-۳/۸	۶۶۴	۶۸۷	۷۲۲	۷۴۳	آرژانتین
۲/۷	-۲/۰	۲۱۴۹	۲۱۹۳	۲۱۳۷	۲۰۲۴	برزیل
۱/۲	۳/۲	۹۴۴	۹۱۵	۷۸۶	۶۷۱	کلمبیا
۰/۷	۰/۸	۵۰۵	۵۰۱	۴۸۸	۴۸۸	اکوادور
۰/۱	-۳/۰	۱۰۷	۱۱۰	۱۱۳	۱۰۷	پرو
۰/۱	-۱۳/۷	۱۲۱	۱۴۰	۱۴۸	۱۵۳	ترینیداد و توباگو
۳/۴	-۱/۵	۲۷۲۵	۲۷۶۶	۲۸۳۸	۳۰۳۳	ونزوئلا
۰/۲	۴/۵	۱۴۵	۱۳۷	۱۳۴	۱۳۴	بقیه جنوب و مرکز آمریکا
۹/۲	-۱/۲	۷۳۵۹	۷۴۴۹	۷۳۶۷	۷۳۵۳	مجموع جنوب و مرکز آمریکا
۱/۱	-۵/۲	۸۷۲	۹۱۹	۱۰۲۳	۱۰۱۴	آذربایجان
۰/۲	-۸/۰	۲۰۷	۲۲۵	۲۴۹	۲۶۵	دانمارک
۰/۱	۱/۴	۱۱۲	۱۱۰	۱۰۶	۹۵	ایتالیا
۲/۰	-۱/۶	۱۷۲۸	۱۷۵۸	۱۷۴۰	۱۶۶۴	قزاقستان
۲/۱	-۷/۰	۱۹۱۶	۲۰۴۰	۲۱۳۷	۲۳۵۱	نروژ
۰/۱	-۲/۸	۸۶	۸۹	۹۰	۹۴	رومانی
۱۲/۸	۱/۲	۱۰۶۴۳	۱۰۵۱۰	۱۰۳۶۵	۱۰۱۳۹	روسیه
۰/۳	۲/۵	۲۲۲	۲۱۷	۲۱۷	۲۱۱	ترکمنستان
۱/۱	-۱۳/۴	۹۶۷	۱۱۱۴	۱۳۵۷	۱۴۸۰	انگلستان
۰/۱	-۱۲/۰	۶۸	۷۷	۷۸	۹۵	ازبکستان
۰/۵	-۰/۷	۳۹۰	۳۹۴	۳۹۴	۴۰۹	بقیه اروپا و اوراسیا
۲۰/۳	-۱/۴	۱۷۲۱۱	۱۷۴۵۱	۱۷۷۵۵	۱۷۸۱۷	مجموع اروپا و اوراسیا
۴/۲	-۱۶/۲	۳۶۸۰	۴۳۵۸	۴۳۵۶	۴۲۴۹	ایران
۳/۷	۱۱/۲	۳۱۱۵	۲۸۰۱	۲۴۹۰	۲۴۵۲	عراق
۳/۷	۸/۹	۳۱۲۷	۲۸۸۰	۲۵۳۶	۲۵۱۱	کویت
۱/۱	۳/۵	۹۲۲	۸۹۱	۸۶۷	۸۱۵	عمان
۲/۰	۶/۳	۱۹۶۶	۱۸۳۶	۱۶۷۶	۱۴۱۶	قطر
۱۳/۳	۳/۷	۱۱۵۳۰	۱۱۱۴۴	۱۰۰۷۵	۹۶۶۳	عربستان سعودی
۰/۲	-۴۹/۹	۱۶۴	۳۲۷	۳۸۵	۴۰۱	سوریه
۳/۷	۱/۶	۳۳۸۰	۳۳۱۹	۲۸۹۵	۲۷۲۳	امارات
۰/۲	-۲۱/۴	۱۸۰	۲۲۸	۲۹۱	۳۰۶	یمن
۰/۲	۱/۳	۲۰۶	۲۰۳	۱۹۲	۱۹۲	بقیه خاورمیانه
۳۲/۵	۰/۹	۲۸۲۷۰	۲۷۹۸۸	۲۵۷۶۳	۲۴۷۲۸	مجموع خاورمیانه

تولید نفت جهان از سال ۲۰۰۹ تا سال ۲۰۱۲	تغییرات ۲۰۱۲ نسبت به ۲۰۱۱ (درصد)	تولید نفت جهان از سال ۲۰۰۹ تا سال ۲۰۱۲				
		۲۰۱۲	۲۰۱۱	۲۰۱۰	۲۰۰۹	هزار بشکه روزانه
۱/۸	-۰/۹	۱۶۶۷	۱۶۸۴	۱۶۹۸	۱۷۷۴	الجزیره
۲/۱	۳/۴	۱۷۸۴	۱۷۲۶	۱۸۶۳	۱۸۰۴	آنگولا
۰/۱	-۱۱/۳	۱۰۱	۱۱۴	۱۲۲	۱۱۸	چاد
۰/۴	۰/۸	۲۹۶	۲۹۳	۲۹۴	۲۶۹	جمهوری کنگو
۰/۹	۰/۱	۷۲۸	۷۲۷	۷۲۵	۷۳۰	مصر
۰/۳	۱۳/۴	۲۸۳	۲۵۲	۲۷۴	۳۰۷	گوینیا
۰/۳	-۳/۵	۲۴۵	۲۵۴	۲۵۵	۲۴۱	گابن
۱/۷	۲۱۵/۱	۱۵۰۹	۴۷۹	۱۶۵۹	۱۶۵۲	لیبی
۲/۸	-۱/۹	۲۴۱۷	۲۴۶۰	۲۵۲۳	۲۲۱۱	نیجریه
♦	-	۳۱	-	-	-	سودان جنوبی
۰/۱	-۸۱/۹	۸۲	۴۵۳	۴۶۵	۴۷۵	سودان
۰/۱	-۴/۷	۶۵	۶۸	۸۰	۸۳	تونس
۰/۳	۱/۰	۲۳۴	۲۳۲	۱۶۷	۱۸۳	بقیه آفریقا
۱۰/۹	۷/۷	۹۴۴۲	۸۷۴۲	۱۰۱۲۳	۹۸۴۸	مجموع آفریقا
۰/۵	-۸/۶	۴۵۸	۴۹۶	۵۷۶	۵۵۹	استرالیا
۰/۲	-۴/۳	۱۵۸	۱۶۵	۱۷۲	۱۶۸	برونئی
۵/۰	۲/۰	۴۱۵۵	۴۰۷۴	۴۰۷۷	۳۸۰۵	چین
۱/۰	-۰/۹	۸۹۴	۹۰۳	۸۷۳	۷۹۶	هند
۱/۱	-۳/۹	۹۱۸	۹۵۲	۱۰۰۳	۹۹۴	اندونزی
۰/۷	۲/۶	۶۵۷	۶۴۰	۷۰۳	۷۰۱	مالزی
۰/۴	۹/۱	۴۴۰	۳۹۷	۳۸۸	۳۷۶	تایلند
۰/۴	۹/۸	۳۴۸	۳۱۷	۳۱۲	۳۴۲	ویتنام
۰/۳	-۴/۹	۲۸۵	۳۰۱	۳۱۵	۳۳۰	بقیه آسیا و اقیانوسیه
۹/۶	۰/۷	۸۳۱۳	۸۲۴۶	۸۴۲۰	۸۰۷۱	مجموع آسیا و اقیانوسیه
۱۰۰/۰	۲/۲	۸۶۱۵۲	۸۴۲۱۰	۸۳۲۷۲	۸۱۲۶۱	مجموع جهان

همان‌طور که از جدول بالا مشهود است در سال ۲۰۱۲ تولید نفت جهان با ۲/۲ درصد افزایش به ۸۶,۱۵۲ میلیون بشکه در روز رسیده است.

۲-۲. گاز طبیعی

یکی دیگر از منابع مهم سوخت‌های فسیلی در جهان گاز طبیعی می‌باشد. جدول ۳-۲ منابع قابل برداشت گاز طبیعی جهان را نمایش می‌دهد.



جدول ۳-۲. منابع گازی جهان (تریلیون مترمکعب)

R/P نسبت	درصد از کل	در انتهای ۲۰۱۲	در انتهای ۲۰۱۱	در انتهای ۲۰۰۲	در انتهای ۱۹۹۲	تریلیون مترمربع
۱۲/۵	۴/۵	۸/۵	۸/۸	۵/۳	۴/۷	آمریکا
۱۲/۷	۱/۱	۲/۰	۲/۰	۱/۷	۲/۷	کانادا
۶/۲	۰/۲	۰/۴	۰/۴	۰/۴	۲/۰	مکزیک
۱۲/۱	۵/۸	۱۰/۸	۱۱/۲	۷/۴	۹/۳	مجموع آمریکای شمالی
۸/۵	۰/۲	۰/۳	۰/۳	۰/۷	۰/۵	آرژانتین
۱۷/۰	۰/۲	۰/۳	۰/۳	۰/۸	۰/۱	بولیوی
۲۶/۰	۰/۲	۰/۵	۰/۵	۰/۲	۰/۱	برزیل
۱۲/۹	۰/۱	۰/۲	۰/۲	۰/۱	۰/۲	کلمبیا
۲۷/۹	۰/۲	۰/۴	۰/۴	۰/۲	۰/۳	پرو
۸/۹	۰/۲	۰/۴	۰/۴	۰/۶	۰/۲	ترینیداد و توباگو
*	۳/۰	۵/۶	۵/۵	۴/۲	۳/۷	ونزوئلا
۱۵/۵	♦	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۲	بقیه جنوب و مرکز آمریکا
۴۲/۸	۴/۱	۷/۶	۷/۵	۷/۰	۵/۴	مجموع جنوب و مرکز آمریکا
۵۷/۱	۰/۵	۰/۹	۰/۹	۰/۹	-	آذربایجان
۵/۹	♦	۰/۰	۰/۰	۰/۱	۰/۱	دانمارک
۶/۱	♦	۰/۱	۰/۱	۰/۲	۰/۲	آلمان
۷/۰	♦	۰/۱	۰/۱	۰/۲	۰/۳	ایتالیا
۶۵/۶	۰/۷	۱/۳	۱/۳	۱/۳	-	قزاقستان
۱۶/۳	۰/۶	۱/۰	۱/۰	۱/۴	۱/۷	هلند
۱۸/۲	۱/۱	۲/۱	۲/۱	۲/۱	۱/۴	نروژ
۲۸/۳	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۲	لهستان
۹/۳	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۳	۰/۵	رومانی
۵۵/۶	۱۷/۶	۳۲/۹	۳۲/۹	۲۹/۸	-	روسیه
*	۹/۳	۱۷/۵	۱۷/۵	۲/۳	-	ترکمنستان
۳۴/۶	۰/۳	۰/۶	۰/۷	۰/۷	-	اوکراین
۶/۰	۰/۱	۰/۲	۰/۲	۱/۰	۰/۶	انگلستان
۱۹/۷	۰/۶	۱/۱	۱/۱	۱/۲	-	ازبکستان
۲۹/۲	۰/۲	۰/۳	۰/۳	۰/۴	۳۴/۷	بقیه اروپا و اوراسیا
۵۶/۴	۳۱/۲	۵۸/۴	۵۸/۴	۴۲/۱	۳۹/۶	مجموع اروپا و اوراسیا
۱۴/۰	۰/۱	۰/۲	۰/۲	۰/۱	۰/۲	بحرین
*	۱۸/۰	۳۳/۶	۳۳/۶	۲۶/۷	۲۰/۷	ایران
*	۱/۹	۳/۶	۳/۶	۳/۲	۳/۱	عراق

R/P نسبت	درصد از کل	در انتهای				
		۲۰۱۲	۲۰۱۱	۲۰۰۲	۱۹۹۲	تریلیون مترمربع
*	۱/۰	۱/۸	۱/۸	۱/۶	۱/۵	کویت
۳۲/۸	۰/۵	۰/۹	۰/۹	۰/۹	۰/۲	عمان
*	۱۳/۴	۲۵/۱	۲۵/۰	۲۵/۸	۶/۷	قطر
۸۰/۱	۴/۴	۸/۲	۸/۲	۶/۶	۵/۲	عربستان سعودی
۳۷/۵	۰/۲	۰/۳	۰/۳	۰/۳	۰/۲	سوریه
*	۳/۳	۶/۱	۶/۱	۶/۱	۵/۸	امارات
۶۳/۱	۰/۳	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۴	یمن
۷۸/۰	۰/۱	۰/۲	۰/۲	۰/۱	۰/۰	بقیه خاورمیانه
*	۴۳/۰	۸۰/۵	۸۰/۴	۷۱/۸	۴۴/۰	مجموع خاورمیانه
۵۵/۳	۲/۴	۴/۵	۴/۵	۴/۵	۳/۷	الجزیره
۳۳/۵	۱/۱	۲/۰	۲/۲	۱/۷	۰/۴	مصر
*	۰/۸	۱/۵	۱/۵	۱/۵	۱/۳	لیبی
*	۲/۸	۵/۲	۵/۲	۵/۰	۳/۷	نیجریه
۶۸/۱	۰/۷	۱/۳	۱/۳	۱/۱	۰/۸	بقیه آفریقا
۶۷/۱	۷/۷	۱۴/۵	۱۴/۷	۱۳/۸	۹/۹	مجموع آفریقا
۷۶/۶	۲/۰	۳/۸	۳/۸	۲/۵	۱/۰	استرالیا
۸/۴	۰/۱	۰/۲	۰/۳	۰/۳	۰/۳	بنگلادش
۲۲/۹	۰/۲	۰/۳	۰/۳	۰/۳	۰/۴	برونئی
۲۸/۹	۱/۷	۳/۱	۳/۱	۱/۳	۱/۴	چین
۳۳/۱	۰/۷	۱/۳	۱/۳	۰/۸	۰/۷	هند
۴۱/۲	۱/۶	۲/۹	۳/۰	۲/۶	۱/۸	اندونزی
۲۰/۳	۰/۷	۱/۳	۱/۲	۲/۵	۱/۷	مالزی
۱۷/۴	۰/۱	۰/۲	۰/۲	۰/۴	۰/۳	میانمار
۱۵/۵	۰/۳	۰/۶	۰/۷	۰/۸	۰/۶	پاکستان
*	۰/۲	۰/۴	۰/۴	۰/۴	۰/۴	گوانیا
۶/۹	۰/۲	۰/۳	۰/۳	۰/۴	۰/۲	تایلند
۶۵/۶	۰/۳	۰/۶	۰/۶	۰/۲	۰/۱	ویتنام
۱۸/۶	۰/۲	۰/۳	۰/۳	۰/۴	۰/۳	بقیه آسیا و اقیانوسیه
۳۱/۵	۸/۲	۱۵/۵	۱۵/۵	۱۳/۰	۹/۴	مجموع آسیا و اقیانوسیه
۵۵/۷	۱۰۰/۰	۱۸۷/۳	۱۸۷/۸	۱۵۴/۹	۱۱۷/۶	مجموع جهان

همان‌طور که جدول ۳-۲ نشان می‌دهد مجموع منابع گازی قابل استحصال جهان در سال

۲۰۱۲ برابر ۱۸۷/۳ تریلیون مترمربع بوده است. علاوه بر این تولید گاز جهان نیز با افزایش تقاضا



طی سالیان گذشته افزایش یافته است. جدول ۴-۲ تولید گاز طبیعی را طی سالیان گذشته نشان می‌دهد.

جدول ۴-۲. تولید گاز طبیعی کشورهای مختلف جهان (میلیارد متر مکعب در سال)

میلیارد متر مکعب	۲۰۰۹	۲۰۱۰	۲۰۱۱	۲۰۱۲	تغییرات ۲۰۱۲ نسبت به ۲۰۱۱	درصد از کل
آمریکا	۵۸۴/۰	۶۰۳/۶	۶۴۸/۵	۶۸۱/۴	۴/۷	۲۰/۴
کانادا	۱۶۴/۰	۱۵۹/۹	۱۵۹/۷	۱۵۶/۵	-۲/۳	۴/۶
مکزیک	۵۹/۴	۵۷/۶	۵۸/۳	۵۸/۵	۰/۱	۱/۷
مجموع آمریکای شمالی	۸۰۷/۴	۸۲۱/۱	۸۶۶/۵	۸۹۶/۴	۳/۱	۲۶/۸
آرژانتین	۴۱/۴	۴۰/۱	۳۸/۸	۳۷/۷	-۳/۰	۱/۱
بولیوی	۱۲/۳	۱۴/۲	۱۶/۵	۱۸/۷	۱۳/۴	۰/۶
برزیل	۱۱/۷	۱۴/۴	۱۶/۷	۱۷/۴	۳/۷	۰/۵
کلمبیا	۱۰/۵	۱۱/۳	۱۱/۰	۱۲/۰	۹/۰	۰/۴
پرو	۳/۵	۷/۲	۱۱/۳	۱۲/۹	۱۳/۷	۰/۴
ترینیداد و توباگو	۴۳/۶	۴۴/۸	۴۲/۹	۴۲/۲	-۱/۸	۱/۳
ونزوئلا	۲۸/۷	۳۱/۰	۳۱/۳	۳۲/۸	۴/۷	۱/۰
بقیه آمریکای مرکزی و جنوبی	۴/۲	۳/۶	۳/۱	۳/۶	۱۴/۴	۰/۱
مجموع آمریکای مرکزی و جنوبی	۱۵۵/۹	۱۶۶/۶	۱۷۱/۵	۱۷۷/۳	۳/۱	۵/۳
آذربایجان	۱۴/۸	۱۵/۱	۱۴/۸	۱۵/۶	۵/۱	۰/۵
دانمارک	۸/۴	۸/۲	۷/۱	۶/۴	-۹/۴	۰/۲
آلمان	۱۲/۲	۱۰/۶	۱۰/۰	۹/۰	-۹/۸	۰/۳
ایتالیا	۷/۳	۷/۶	۷/۷	۷/۸	۱/۷	۰/۲
قزاقستان	۱۷/۸	۱۷/۶	۱۹/۳	۱۹/۷	۲/۰	۰/۶
هلند	۶۲/۷	۷۰/۵	۶۴/۲	۶۳/۹	-۰/۸	۱/۹
نروژ	۱۰۴/۸	۱۰۷/۷	۱۰۱/۷	۱۱۴/۹	۱۲/۶	۳/۴
لهستان	۴/۱	۴/۱	۴/۳	۴/۲	-۱/۱	۰/۱
رومانی	۱۱/۳	۱۰/۹	۱۰/۹	۱۰/۹	♦	۰/۳
روسیه	۵۲۷/۷	۵۸۸/۹	۶۰۷/۰	۵۹۲/۳	-۲/۷	۱۷/۶
ترکمنستان	۳۶/۴	۴۲/۴	۵۹/۵	۶۴/۴	۷/۸	۱/۹
اوکراین	۱۹/۲	۱۸/۱	۱۸/۶	۱۸/۶	-۰/۸	۰/۶
انگلستان	۶۲/۴	۵۹/۷	۴۷/۶	۴۱/۰	-۱۴/۱	۱/۲
ازبکستان	۶۰/۰	۵۹/۶	۵۷/۰	۵۶/۹	-۰/۴	۱/۷
بقیه اروپا و اوراسیا	۹/۷	۱۰/۲	۱۰/۲	۹/۸	-۴/۳	۰/۳
مجموع اروپا و اوراسیا	۹۵۸/۸	۱۰۳۱/۲	۱۰۳۹/۹	۱۰۳۵/۴	-۰/۷	۳۰/۷
بحرین	۱۲/۸	۱۳/۱	۱۳/۳	۱۴/۲	۶/۹	۰/۴
ایران	۱۳۱/۲	۱۴۶/۲	۱۵۱/۸	۱۶۰/۵	۵/۴	۴/۸
عراق	۱/۲	۱/۳	۰/۹	۰/۸	-۹/۳	♦
کویت	۱۱/۵	۱۱/۷	۱۳/۵	۱۴/۵	۷/۲	۰/۴
عمان	۲۴/۸	۲۷/۱	۲۶/۵	۲۹/۰	۸/۹	۰/۹
قطر	۸۹/۳	۱۱۶/۷	۱۴۵/۳	۱۵۷/۰	۷/۸	۴/۷
عربستان سعودی	۷۸/۵	۸۷/۷	۹۲/۳	۱۰۲/۸	۱۱/۱	۳/۰
سوریه	۵/۶	۸/۰	۸/۷	۷/۶	-۱۳/۴	۰/۲

میلیارد متر مکعب	۲۰۰۹	۲۰۱۰	۲۰۱۱	۲۰۱۲	تغییرات ۲۰۱۲ نسبت به ۲۰۱۱	درصد از کل
امارات	۴۸/۸	۵۱/۳	۵۲/۳	۵۱/۷	-۱/۵	۱/۵
یمن	۰/۸	۶/۲	۹/۶	۷/۶	-۲۱/۳	۰/۲
بقیه خاورمیانه	۳/۰	۳/۴	۴/۴	۲/۷	-۴۰/۱	۰/۱
مجموع خاورمیانه	۴۰۷/۳	۴۷۲/۷	۵۱۸/۷	۵۴۸/۴	۵/۴	۱۶/۳
آرژانتین	۷۹/۶	۸۰/۴	۸۲/۷	۸۱/۵	-۱/۷	۲/۴
مصر	۶۲/۷	۶۱/۳	۶۱/۴	۶۰/۹	-۱/۲	۱/۸
لیبی	۱۵/۹	۱۶/۸	۷/۹	۱۲/۲	۵۴/۸	۰/۴
نیجریه	۲۶/۰	۳۷/۳	۴۰/۶	۴۳/۲	۶/۲	۱/۳
بقیه آفریقا	۱۶/۳	۱۸/۴	۱۸/۶	۱۸/۴	-۱/۰	۰/۵
مجموع آفریقا	۲۰۰/۴	۲۱۴/۳	۲۱۱/۲	۲۱۶/۲	۲/۱	۶/۴
استرالیا	۴۲/۳	۴۵/۶	۴۵/۰	۴۹/۰	۸/۸	۱/۵
بنگلادش	۱۸/۵	۱۹/۹	۲۰/۱	۲۱/۸	۸/۲	۰/۶
برونئی	۱۱/۴	۱۲/۳	۱۲/۸	۱۲/۶	-۲/۱	۰/۴
چین	۸۵/۳	۹۴/۸	۱۰۲/۷	۱۰۷/۲	۴/۱	۳/۲
هند	۳۹/۲	۵۰/۸	۴۶/۱	۴۰/۲	-۱۳/۱	۱/۲
اندونزی	۷۱/۹	۸۲/۰	۷۵/۹	۷۱/۱	-۶/۶	۲/۱
مالزی	۶۳/۴	۶۵/۲	۶۵/۳	۶۵/۲	-۰/۳	۱/۹
میانمار	۱۱/۶	۱۲/۴	۱۲/۸	۱۲/۷	-۰/۶	۰/۴
پاکستان	۳۸/۴	۳۹/۶	۳۹/۲	۴۱/۵	۵/۶	۱/۲
تایلند	۳۰/۹	۳۶/۳	۳۷/۰	۴۱/۴	۱۱/۵	۱/۲
ویتنام	۸/۰	۹/۴	۸/۵	۹/۴	۱۰/۶	۰/۳
بقیه آسیا و اقیانوسیه	۱۸/۶	۱۸/۱	۱۸/۴	۱۸/۱	-۱/۹	۰/۵
مجموع آسیا و اقیانوسیه	۴۳۹/۶	۴۸۶/۵	۴۸۳/۶	۴۹۰/۲	۱/۱	۱۴/۵
مجموع جهان	۲۹۶۹/۳	۳۱۹۲/۳	۳۲۹۱/۳	۳۳۶۳/۹	۱/۹	۱۰۰/۰

طبق جدول ۴-۲ تولید گاز طبیعی در سال ۲۰۱۲ به ۳۳۶۳/۹ میلیارد مترمکعب رسیده که این رقم ۱/۹ درصد بیشتر از سال ۲۰۱۱ است.

۲-۳. زغال سنگ

سومین منبع فسیلی انرژی زغال سنگ است. جدول ۵-۲ منابع زغال سنگ جهان را نشان می‌دهد.



جدول ۵-۲. منابع جهانی زغال سنگ (میلیون تن)

میلیون تن	bituminous	Lignite and Sub-bituminous	مجموع	درصد از مجموع	نسبت تولید منابع به تولید
آمریکا	۱۰۸۵۰۱	۱۲۸۷۹۴	۲۳۷۲۹۵	۲۷/۶	۲۵۷
کانادا	۳۴۷۴	۳۱۰۸	۶۵۸۲	۰/۸	۹۸
مکزیک	۸۶۰	۳۵۱	۱۲۱۱	۰/۱	۸۸
مجموع آمریکای شمالی	۱۱۲۸۳۵	۱۳۲۲۵۳	۲۴۵۰۸۸	۲۸/۵	۲۴۴
برزیل	-	۴۵۵۹	۴۵۵۹	۰/۵	*
کلمبیا	۶۳۶۶	۳۸۰	۶۷۴۶	۰/۸	۷۶
ونزوئلا	۴۷۹	-	۴۷۹	۰/۱	۲۹۲
بقیه آمریکای مرکزی و جنوبی	۴۵	۶۷۹	۷۲۴	۰/۱	*
مجموع آمریکای مرکزی و جنوبی	۶۸۹۰	۵۶۱۸	۱۲۵۰۸	۱/۵	۱۲۹
بلغارستان	۲	۲۳۶۴	۲۳۶۶	۰/۳	۷۲
جمهوری چک	۱۹۲	۹۰۸	۱۱۰۰	۰/۱	۲۰
آلمان	۹۹	۴۰۶۰۰	۴۰۶۹۹	۴/۷	۲۰۷
یونان	-	۳۰۲۰	۳۰۲۰	۰/۴	۵۰
مجارستان	۱۳	۱۶۴۷	۱۶۶۰	۰/۲	۱۷۹
قزاقستان	۲۱۵۰۰	۱۲۱۰۰	۳۳۶۰۰	۳/۹	۲۸۹
لهستان	۴۳۳۸	۱۳۷۱	۵۷۰۹	۰/۷	۴۰
رومانی	۱۰	۲۸۱	۲۹۱	♦	۹
روسیه	۴۹۰۸۸	۱۰۷۹۲۲	۱۵۷۰۱۰	۱۸/۲	۴۴۳
اسپانیا	۲۰۰	۳۳۰	۵۳۰	۰/۱	۸۵
ترکیه	۵۲۹	۱۸۱۴	۲۳۴۳	۰/۳	۳۳
اوکراین	۱۵۳۵۱	۱۸۵۲۲	۳۳۸۷۳	۳/۹	۳۸۴
انگلستان	۲۲۸	-	۲۲۸	♦	۱۴
بقیه اروپا و اوراسیا	۱۴۴۰	۲۰۷۳۵	۲۲۱۷۵	۲/۶	۲۳۴
مجموع اروپا و اوراسیا	۹۲۹۹۰	۲۱۱۶۱۴	۳۰۴۶۰۴	۳۵/۴	۲۳۸
آفریقای جنوبی	۳۰۱۵۶	-	۳۰۱۵۶	۳/۵	۱۱۶
زیمبابوه	۵۰۲	-	۵۰۲	۰/۱	۱۹۶
بقیه آفریقا	۸۶۰	۱۷۴	۱۰۳۴	۰/۱	*
خاورمیانه	۱۲۰۳	-	۱۲۰۳	۰/۱	*
مجموع خاورمیانه و آفریقا	۳۲۷۲۱	۱۷۴	۳۲۸۹۵	۳/۸	۱۲۴
استرالیا	۳۷۱۰۰	۳۹۳۰۰	۷۶۴۰۰	۸/۹	۱۷۷
چین	۶۲۲۰۰	۵۲۳۰۰	۱۱۴۵۰۰	۱۳/۳	۳۱
هند	۵۶۱۰۰	۴۵۰۰	۶۰۶۰۰	۷/۰	۱۰۰
اندونزی	۱۵۲۰	۴۰۰۹	۵۵۲۹	۰/۶	۱۴
ژاپن	۳۴۰	۱۰	۳۵۰	♦	۲۶۵
نیوزلند	۳۳	۵۳۸	۵۷۱	۰/۱	۱۱۵
کره شمالی	۳۰۰	۳۰۰	۶۰۰	۰/۱	۱۹

میلیون تن	bituminous	Lignite and Sub-bituminous	مجموع	درصد از مجموع	نسبت تولید منابع به تولید
پاکستان	-	۲۰۷۰	۲۰۷۰	۰/۲	*
کره جنوبی	-	۱۲۶	۱۲۶	♦	۶۰
تایلند	-	۱۲۳۹	۱۲۳۹	۰/۱	۶۸
ویتنام	۱۵۰	-	۱۵۰	♦	۴
بقیه آسیا و اقیانوسیه	۱۵۸۳	۲۱۲۵	۳۷۰۸	۰/۴	۸۸
مجموع آسیا و اقیانوسیه	۱۵۹۳۲۶	۱۰۶۵۱۷	۲۶۵۸۴۳	۳۰/۹	۵۱
مجموع جهان	۴۰۴۷۶۲	۴۵۶۱۷۶	۸۶۰۹۳۸	۱۰۰/۰	۱۰۹

با افزایش قیمت نفت روند تقاضا برای زغال‌سنگ نیز افزایش یافته است. جدول ۶-۲ میزان مصرف زغال‌سنگ طی سال‌های گذشته را نشان می‌دهد.

جدول ۶-۲ مصرف زغال‌سنگ جهان (میلیون تن)

میلیون تن	۲۰۰۹	۲۰۱۰	۲۰۱۱	۲۰۱۲	تغییرات ۲۰۱۲ نسبت به ۲۰۱۱	درصد از مجموع
آمریکا	۹۷۵/۲	۹۸۳/۷	۹۹۳/۹	۹۲۲/۱	-۷/۵	۱۳/۴
کانادا	۶۴/۶	۶۸/۰	۶۷/۵	۶۶/۹	-۱/۱	۰/۹
مکزیک	۱۰/۴	۱۲/۰	۱۴/۵	۱۳/۸	-۵/۳	۰/۲
مجموع آمریکای شمالی	۱۰۵۰/۲	۱۰۶۳/۷	۱۰۷۵/۹	۱۰۰۲/۸	-۷/۱	۱۴/۵
برزیل	۵/۱	۵/۴	۵/۴	۵/۸	۵/۷	۰/۱
کلمبیا	۷۲/۸	۷۴/۴	۸۵/۸	۸۹/۲	۳/۷	۱/۵
ونزوئلا	۳/۳	۲/۷	۲/۳	۱/۶	-۲۷/۹	♦
بقیه آمریکای مرکزی و جنوبی	۰/۸	۰/۵	۰/۶	۰/۷	۹/۳	♦
مجموع آمریکای مرکزی و جنوبی	۸۱/۹	۸۳/۰	۹۴/۱	۹۷/۳	۲/۹	۱/۶
بلغارستان	۲۷/۲	۲۹/۴	۳۷/۱	۳۲/۸	-۱۲/۱	۰/۱
جمهوری چک	۵۶/۴	۵۵/۲	۵۷/۹	۵۵/۰	-۴/۲	۰/۵
فرانسه	۰/۱	۰/۳	۰/۱	۰/۱	-۰/۳	♦
آلمان	۱۸۳/۷	۱۸۲/۳	۱۸۸/۶	۱۹۶/۲	۲/۰	۱/۲
یونان	۶۵/۶	۵۸/۳	۶۰/۴	۶۰/۴	-۰/۵	۰/۲
مجارستان	۹/۰	۹/۱	۹/۶	۹/۳	-۳/۰	♦
قزاقستان	۱۰۰/۹	۱۰۶/۶	۱۱۱/۴	۱۱۶/۴	۴/۲	۱/۵
لهستان	۱۳۵/۲	۱۳۳/۲	۱۳۹/۳	۱۴۴/۱	۳/۶	۱/۵
رومانی	۳۴/۰	۳۱/۱	۳۵/۵	۳۴/۱	-۴/۳	۰/۲
روسیه	۳۰۱/۳	۳۲۱/۶	۳۳۵/۱	۳۵۴/۸	۶/۱	۴/۴
اسپانیا	۹/۴	۸/۴	۶/۶	۶/۲	-۵/۵	۰/۱
ترکیه	۷۹/۵	۷۳/۴	۷۶/۱	۷۲/۰	-۵/۶	۰/۴
اوکراین	۷۳/۸	۷۶/۸	۸۴/۶	۸۸/۲	۴/۰	۱/۲
انگلستان	۱۷/۹	۱۸/۴	۱۸/۶	۱۶/۸	-۱۰/۱	۰/۳
بقیه اروپا و اوراسیا	۸۸/۰	۸۸/۸	۹۶/۰	۹۴/۷	-۱/۵	۰/۶
مجموع اروپا و اوراسیا	۱۱۸۱/۹	۱۱۹۳/۰	۱۲۵۶/۸	۱۲۸۱/۰	۲/۷	۱۲/۲
مجموع خاورمیانه	۱/۲	۱/۰	۱/۲	۱/۲	-۰/۳	♦



میلیون تن	۲۰۰۹	۲۰۱۰	۲۰۱۱	۲۰۱۲	تغییرات ۲۰۱۲ نسبت به ۲۰۱۱	درصد از مجموع
آفریقای جنوبی	۲۵۰/۶	۲۵۷/۲	۲۵۱/۶	۲۶۰/۰	۳/۱	۳/۸
زیمبابوه	۱/۷	۲/۷	۲/۶	۲/۶	-۰/۳	♦
بقیه آفریقا	۱/۵	۱/۸	۱/۸	۱/۸	-۰/۳	♦
مجموع آفریقا	۲۵۳/۸	۲۶۱/۷	۲۵۵/۹	۲۶۴/۴	۳/۰	۳/۹
استرالیا	۴۱۸/۵	۴۲۴/۰	۴۱۵/۵	۴۳۱/۲	۴/۲	۶/۳
چین	۲۹۷۳/۰	۳۲۳۵/۰	۳۵۱۶/۰	۳۶۵۰/۰	۳/۵	۴۷/۵
هند	۵۵۶/۰	۵۷۳/۸	۵۷۰/۱	۶۰۵/۸	۵/۸	۶/۰
اندونزی	۲۵۶/۲	۲۷۵/۲	۳۵۳/۳	۳۸۶/۰	۹/۰	۶/۲
ژاپن	۱/۳	۰/۹	۱/۳	۱/۳	۳/۶	♦
نیوزلند	۴/۶	۵/۳	۴/۹	۴/۹	-۰/۳	۰/۱
پاکستان	۳/۵	۳/۳	۳/۲	۲/۸	-۱۳/۵	♦
کره جنوبی	۲/۵	۲/۱	۲/۱	۲/۱	۰/۱	♦
تایلند	۱۷/۸	۱۸/۳	۲۱/۳	۱۸/۳	-۱۴/۳	۰/۱
ویتنام	۴۵/۰	۴۴/۰	۴۴/۵	۴۱/۹	-۶/۱	۰/۶
بقیه آسیا و اقیانوسیه	۵۴/۰	۶۷/۴	۷۵/۴	۷۳/۶	-۳/۱	۱/۰
مجموع آسیا و اقیانوسیه	۴۳۳۲/۴	۴۶۴۹/۴	۵۰۰۷/۶	۵۲۱۸/۰	۴/۰	۶۷/۸
مجموع جهان	۶۹۰۱/۳	۷۲۵۱/۸	۷۶۹۱/۶	۷۸۶۴/۵	۲/۰	۱۰۰/۰

تقاضا برای زغال سنگ در سال ۲۰۱۲ نسبت به سال ۲۰۱۱، در حدود ۲ درصد افزایش داشته است.

۲-۴. انرژی های نو

همان طور که اشاره شد منابع گسترده ای از انرژی در طبیعت وجود دارد، اما محدودیت های تکنولوژیکی و اقتصادی، مانع دستیابی به این منابع می شود. جدول زیر میزان انرژی که بشر می تواند با تکنولوژی موجود و همچنین محدودیت های محیطی و اقتصادی تولید کند را بیان می کند.

جدول ۲-۷. میزان انرژی قابل برداشت سالیانه از منابع تجدیدپذیر

منبع انرژی	میزان انرژی قابل برداشت سالیانه (EJ/Y)*
بادی، دریایی	۲۲
بادی، خشکی	۳۷۹
خورشیدی PV	۱۶۹۳
خورشیدی Thermal	۹۹۲
زمین گرمایی	۴۵
آبی	۵۰
بایومس	۵۵
امواج	۲۰
جزر و مد	۳۶۰

Source: "Global Potential Of Renewable Energy Resources: a Literature Assessment", Monique Hoogwijk, Renewable Energy Policy Network for the 21 st Century.

* Exajoul=10¹⁸joul

علاوه بر محدودیت‌های تکنولوژیکی و اقتصادی برای استحصال منابع تجدیدپذیر، محدودیت‌های دیگری نیز مانع توسعه این تکنولوژی‌های تولید برق می‌شود. به عنوان مثال برای کشت و تولید دانه‌های روغنی و تولید انرژی زیستی، محدودیت زمین کشاورزی مرغوب مانع توسعه این صنعت می‌شود. زمین‌های کشاورزی عموماً برای تولید منابع غذایی مورد استفاده قرار می‌گیرند. حال تغییر کاربری این زمین تأمین مواد غذایی بشر را با مشکل روبرو خواهد کرد. در مورد انرژی بادی در خشکی مشکل مشابهی وجود دارد. جنگل‌ها، مراتع و محدودیت‌های تقنینی مانع گسترش این تکنولوژی‌ها برای استحصال بیشتر می‌شود.

اما با این وجود با پیشرفت تکنولوژی و افزایش قیمت دیگر حامل‌های انرژی مثل نفت و گاز رویکرد به این تکنولوژی‌ها بیشتر شده است. جداول زیر ظرفیت تولید واحدهای احداث شده در جهان برای تولید از منابع تجدیدپذیر را نشان می‌دهد.

جدول ۸-۲. ظرفیت تولید انرژی زمین‌گرمایی جهان (مگاوات)

کشور	۲۰۰۹	۲۰۱۰	۲۰۱۱	۲۰۱۲	تغییرات ۲۰۱۲ نسبت ۲۰۱۱ (درصد)	درصد نسبت به کل
اتریش	۱	۱	۱	۱	۰/۰	۰/۰
استرالیا	۱	۱	۱	۱	۰/۰	۰/۰
چین	۲۴	۲۴	۲۴	۲۴	۰/۰	۰/۲
کاستاریکا	۱۶۶	۱۶۶	۲۰۸	۲۰۸	۰/۰	۱/۸
السالوادور	۲۰۴	۲۰۴	۲۰۴	۲۰۴	۰/۰	۱/۸
اتیوپی	۷	۷	۷	۷	۰/۰	۰/۱
فرانسه	۱۶	۱۶	۱۶	۱۶	۰/۰	۰/۱
آلمان	۸	۸	۸	۱۲	۶۱/۳	۰/۱
گوآتمالا	۵۲	۵۲	۵۲	۵۲	۰/۰	۰/۵
آیس لند	۵۷۶	۵۷۵	۶۶۵	۶۶۵	۰/۰	۵/۸
اندونزی	۱۱۸۹	۱۱۹۳	۱۲۰۹	۱۳۳۹	۱۰/۸	۱۱/۷
ایتالیا	۸۴۳	۸۶۳	۸۶۳	۸۶۳	۰/۰	۷/۵
ژاپن	۵۰۰	۵۰۲	۵۰۲	۵۰۲	۰/۰	۴/۴
کنیا	۱۶۷	۱۶۷	۱۶۷	۱۷۵	۴/۵	۱/۵
مکزیک	۹۶۵	۹۶۵	۸۸۷	۸۱۲	-۸/۵	۷/۱
نیوزلند	۶۲۹	۷۶۹	۷۶۹	۷۶۹	۰/۰	۶/۷
نیکاراگو	۸۸	۸۸	۸۸	۱۶۰	۸۲/۳	۱/۴
پاپوآنیوگینیا	۵۶	۵۶	۵۶	۵۶	۰/۰	۰/۵
فیلیپین	۱۹۵۳	۱۹۶۶	۱۹۶۷	۱۹۶۸	۰/۱	۱۷/۲
پرتغال	۲۹	۲۹	۲۹	۲۹	۰/۰	۰/۳
روسیه	۸۲	۸۲	۸۲	۸۲	۰/۰	۰/۷
تایلند	۰	۰	۰	۰	۰/۰	۰/۰
ترکیه	۸۲	۹۴	۱۱۴	۱۱۴	۰/۰	۱/۰
آمریکا	۳۲۰۷	۳۲۲۶	۳۲۳۶	۳۳۸۶	۴/۶	۲۹/۶
مجموع جهان	۱۰۸۴۴	۱۱۰۵۵	۱۱۱۵۶	۱۱۴۴۶	۲/۶	۱۰۰/۰



جدول ۹-۲. ظرفیت تولید انرژی بادی جهان (مگاوات)

مگاوات	۲۰۰۹	۲۰۱۰	۲۰۱۱	۲۰۱۲	تغییرات ۲۰۱۲ نسبت به ۲۰۱۱ (درصد)	درصد از مجموع
آمریکا	۳۵۱۵۹	۴۰۲۷۴	۴۷۰۸۴	۶۰۲۰۸	۲۷/۹	۲۱/۲
کانادا	۳۳۲۱	۴۰۱۱	۵۲۷۸	۶۲۱۴	۱۷/۷	۲/۲
مکزیک	۴۵۳	۷۶۹	۱۱۲۳	۱۵۱۲	۳۴/۶	۰/۵
مجموع آمریکای شمالی	۳۸۹۳۳	۴۵۰۵۴	۵۳۴۸۵	۶۷۹۳۴	۲۷/۰	۲۳/۹
آرژانتین	۳۳	۳۳	۱۱۲	۱۶۶	۴۸/۲	۰/۱
برزیل	۶۰۶	۹۳۱	۱۴۳۱	۲۵۰۸	۷۵/۳	۰/۹
کاستاریکا	۱۲۹	۱۷۹	۱۹۲	۲۰۷	۷/۸	۰/۱
بقیه آمریکای جنوبی و مرکزی	۳۲۱	۴۶۳	۹۳۰	۱۱۵۴	۲۴/۱	۰/۴
مجموع آفریقای جنوبی و مرکزی	۱۰۸۹	۱۶۰۶	۲۶۶۵	۴۰۳۵	۵۱/۴	۱/۴
استرالیا	۹۹۷	۱۰۱۳	۱۰۸۲	۱۳۷۸	۲۷/۴	۰/۵
بلژیک	۶۰۵	۹۵۵	۱۱۴۷	۱۴۴۴	۲۵/۹	۰/۵
بلغارستان	۳۳۵	۴۸۸	۵۸۲	۶۴۳	۱۰/۵	۰/۲
دانمارک	۳۴۰۸	۳۸۰۵	۳۹۲۷	۴۱۳۷	۵/۳	۱/۵
فنلاند	۱۱۷	۱۶۹	۱۷۸	۲۶۸	۵۰/۶	۰/۱
فرانسه	۴۷۷۵	۵۹۶۱	۶۸۳۶	۷۵۹۳	۱۱/۱	۲/۷
آلمان	۲۵۷۰۳	۲۷۱۹۱	۲۹۰۷۱	۳۱۳۱۵	۷/۷	۱۱/۰
یونان	۱۱۵۵	۱۳۲۳	۱۶۳۴	۱۷۴۹	۷/۰	۰/۶
مجارستان	۲۲۹	۳۲۳	۳۵۷	۳۵۷	۰/۰	۰/۱
ایرلند	۸۰۷	۸۰۷	۱۶۸۸	۱۸۱۲	۷/۳	۰/۶
ایتالیا	۴۸۴۵	۵۷۹۳	۶۷۳۳	۷۹۹۸	۱۸/۸	۲/۸
هلند	۲۲۲۶	۲۲۴۱	۲۳۰۹	۲۵۵۲	۱۰/۵	۰/۹
نروژ	۳۹۰	۴۱۱	۴۸۷	۶۸۳	۴۰/۲	۰/۲
لهستان	۸۴۹	۱۲۳۱	۱۶۶۷	۲۵۴۷	۵۲/۸	۰/۹
پرتغال	۳۴۷۴	۳۸۳۷	۴۲۱۴	۴۳۶۳	۳/۵	۱/۵
رومانی	۱۲۹	۴۷۰	۹۹۰	۱۹۱۳	۹۳/۲	۰/۷
اسپانیا	۱۹۱۶۰	۱۹۸۵۰	۲۱۲۳۹	۲۲۳۶۲	۵/۳	۷/۹
سوئد	۱۵۳۷	۲۱۴۱	۲۹۰۴	۳۷۵۰	۲۹/۱	۱/۳
ترکیه	۸۰۱	۱۳۲۰	۱۷۲۹	۲۲۶۱	۳۰/۸	۰/۸
انگلستان	۴۴۲۴	۵۳۷۸	۶۴۸۸	۸۸۷۱	۳۶/۷	۳/۱
بقیه اروپا و اوراسیا	۵۶۵	۸۸۵	۱۰۸۲	۱۵۵۷	۴۳/۹	۰/۵
مجموع اروپا و اوراسیا	۷۶۹۱۱	۸۶۲۳۳	۹۶۳۴۵	۱۰۹۵۵۳	۱۳/۷	۳۸/۵
ایران	۹۲	۹۰	۹۱	۹۱	۰/۰	۰/۰
بقیه خاورمیانه	۹	۱۱	۱۳	۱۹	۴۶/۲	۰/۰
مجموع خاورمیانه	۱۰۱	۱۰۱	۱۰۴	۱۱۰	۵/۸	۰/۰
مصر	۵۵۲	۵۵۲	۵۵۲	۵۵۲	۰/۰	۰/۲
مراکش	۲۵۴	۲۶۳	۲۹۲	۳۹۴	۳۴/۹	۰/۱
تونس	۱۶۰	۲۴۷	۲۷۷	۳۲۷	۱۸/۱	۰/۱
بقیه آمریکا	۴۹	۵۱	۱۲۵	۲۱۸	۷۴/۴	۰/۱
مجموع آفریقا	۱۰۱۵	۱۱۱۳	۱۲۴۶	۱۴۹۱	۱۹/۷	۰/۵

مگاوات	۲۰۰۹	۲۰۱۰	۲۰۱۱	۲۰۱۲	تغییرات ۲۰۱۲ نسبت به ۲۰۱۱ (درصد)	درصد از مجموع
استرالیا	۱۸۸۶	۲۰۸۴	۲۴۷۶	۲۸۳۴	۱۴/۵	۱/۰
چین	۲۵۸۵۳	۴۴۷۸۱	۶۲۴۱۲	۷۵۳۷۲	۲۰/۸	۲۶/۵
هند	۱۰۹۲۶	۱۳۰۶۵	۱۶۱۷۹	۱۸۴۲۰	۱۳/۹	۶/۵
ژاپن	۲۲۰۸	۲۴۲۹	۲۵۹۵	۲۶۷۳	۳/۰	۰/۹
نیوزلند	۴۶۷	۴۹۵	۶۰۳	۶۰۳	۰/۰	۰/۲
کره جنوبی	۳۱۱	۳۴۲	۳۷۰	۴۴۶	۲۰/۵	۰/۲
تایوان	۳۷۴	۴۷۶	۵۲۳	۵۸۰	۱۰/۹	۰/۲
بقیه آسیا و اقیانوسیه	۷۴	۹۴	۱۲۳	۱۸۶	۵۱/۲	۰/۱
مجموع آسیا و اقیانوسیه	۴۲۰۹۹	۶۳۷۶۶	۸۵۲۸۱	۱۰۱۱۱۴	۱۸/۶	۳۵/۶
مجموع جهان	۱۶۰۱۴۸	۱۹۷۸۷۳	۲۳۹۱۲۵	۲۸۴۲۳۷	۱۸/۹	۱۰۰/۰

جدول ۱۰-۲. ظرفیت تولید انرژی خورشیدی جهان، مگاوات

مگاوات	۲۰۰۹	۲۰۱۰	۲۰۱۱	۲۰۱۲	تغییرات ۲۰۱۲ نسبت به ۲۰۱۱ (درصد)	درصد نسبت به مجموع
آمریکا	۱۶۱۶	۲۵۳۴	۳۹۶۶	۷۳۱۲	۸۴/۴	۷/۳
کانادا	۹۵	۲۸۱	۵۵۹	۸۲۷	۴۸/۰	۰/۸
مکزیک	۲۵	۳۱	۳۷	۵۲	۴۰/۴	۰/۱
مجموع آمریکای شمالی	۱۷۳۶	۲۸۴۶	۴۵۶۲	۸۱۹۱	۷۹/۶	۸/۲
اتریش	۵۳	۹۶	۱۸۷	۴۲۲	۱۲۵/۳	۰/۴
بلژیک	۶۲۷	۱۰۵۵	۲۰۵۱	۲۶۵۰	۲۹/۲	۲/۶
بلغارستان	۷	۳۶	۱۴۱	۹۰۸	۵۴۴/۰	۰/۹
جمهوری چک	۴۶۲	۱۹۵۳	۱۹۵۹	۲۰۷۲	۵/۸	۲/۱
دانمارک	۵	۷	۱۷	۳۹۲	۲۲۴۵/۵	۰/۴
فنلاند	۵	۷	۸	۸	۰/۰	۰/۰
فرانسه	۳۸۰	۱۱۹۷	۲۶۶۰	۳۶۹۲	۳۸/۸	۳/۷
آلمان	۱۰۵۶۶	۱۷۵۵۴	۲۵۰۳۹	۳۲۶۴۳	۳۰/۴	۳۲/۶
یونان	۵۵	۱۹۸	۶۲۴	۱۵۳۶	۱۴۶/۲	۱/۵
ایتالیا	۱۱۸۱	۳۵۰۲	۱۲۸۰۳	۱۶۲۴۱	۲۶/۹	۱۶/۲
هلند	۶۸	۸۸	۱۳۱	۲۵۶	۹۵/۱	۰/۳
نروژ	۹	۹	۱۰	۱۰	۴/۲	۰/۰
پرتغال	۱۰۲	۱۳۱	۱۴۴	۲۱۲	۴۷/۳	۰/۲
اسلوواکی	۰	۱۸۷	۵۰۸	۵۲۳	۳/۰	۰/۵
اسپانیا	۳۵۲۳	۳۹۱۵	۴۲۶۰	۴۵۳۷	۶/۵	۴/۵
سوئد	۹	۱۱	۱۶	۲۴	۵۱/۳	۰/۰
سوئیس	۷۴	۱۱۱	۲۱۱	۴۱۰	۹۴/۲	۰/۴
ترکیه	۵	۶	۷	۹	۲۸/۶	۰/۰
انگلستان	۲۶	۷۰	۹۷۶	۱۶۵۵	۶۹/۶	۱/۷
بقیه اتحادیه اروپا	۳۵	۵۰	۱۱۳	۲۶۷	۱۳۶/۰	۰/۳
مجموع اروپا	۱۷۱۹۰	۳۰۱۸۳	۵۱۸۶۵	۶۸۴۶۷	۳۲/۰	۶۸/۴



مگاوات	۲۰۰۹	۲۰۱۰	۲۰۱۱	۲۰۱۲	تغییرات ۲۰۱۲ نسبت به ۲۰۱۱ (درصد)	درصد نسبت به مجموع
استرالیا	۱۸۸	۵۷۱	۱۴۰۸	۲۴۰۸	۷۱/۰	۲/۴
چین	۳۰۰	۸۰۰	۳۳۰۰	۸۳۰۰	۱۵۱/۵	۸/۳
اسرائیل	۲۵	۷۰	۱۹۰	۲۵۰	۳۱/۶	۰/۲
هند	۱۰۱	۳۵	۴۸۱	۱۱۷۶	۱۴۴/۳	۱/۲
ژاپن	۲۶۲۷	۳۶۱۸	۴۹۱۴	۶۹۱۴	۴۰/۷	۶/۹
آمریکای جنوبی	۵۲۴	۶۵۶	۸۱۲	۱۰۶۴	۳۱/۰	۱/۱
مالزی	۱۱	۱۳	۱۴	۳۶	۱۶۳/۰	۰/۰
بقیه جهان	۱۲۷۸	۱۶۲۵	۲۳۲۵	۳۳۱۰	۴۲/۳	۳/۳
مجموع بقیه	۵۰۵۳	۷۳۸۷	۱۳۴۴۴	۲۳۴۵۷	۷۴/۵	۲۳/۴
مجموع جهان	۲۳۹۷۹	۴۰۴۱۶	۶۹۸۷۱	۱۰۰۱۱۵	۴۳/۳	۱۰۰/۰

جدول ۱۱-۲. تولید انرژی‌های زیستی، معادل (هزار تن نفت خام)

معادل هزار تن نفت خام	۲۰۰۹	۲۰۱۰	۲۰۱۱	۲۰۱۲	تغییرات ۲۰۱۲ نسبت به ۲۰۱۱ (درصد)	درصد از مجموع
آمریکا	۲۱۶۹۷	۲۵۵۶۸	۲۸۵۱۸	۲۷۳۶۰	-۴/۳	۴۵/۴
کانادا	۷۲۱	۷۹۰	۹۲۹	۹۴۹	۱/۹	۱/۶
مجموع آمریکای شمالی	۲۲۴۲۲	۲۶۳۷۱	۲۹۴۵۹	۲۸۳۲۱	-۴/۱	۴۷/۰
آرژانتین	۱۰۴۸	۱۶۵۶	۲۲۱۸	۲۲۶۷	۱/۹	۳/۸
برزیل	۱۳۹۶۲	۱۵۵۷۵	۱۳۱۹۷	۱۳۵۴۷	۲/۴	۲۲/۵
کلمبیا	۳۲۶	۳۱۸	۳۸۶	۴۰۳	۴/۰	۰/۷
بقیه آمریکای جنوبی و مرکزی	۶۰۶	۳۱۴	۴۵۷	۴۵۸	-	۰/۸
مجموع آمریکای جنوبی و مرکزی	۱۵۹۴۲	۱۷۸۶۳	۱۶۲۵۹	۱۶۶۷۵	۲/۳	۲۷/۷
اتریش	۳۵۴	۳۷۵	۳۷۰	۳۷۰	-۰/۳	۰/۶
بلژیک	۴۷۳	۴۶۲	۵۰۳	۵۱۰	۱/۱	۰/۸
فرانسه	۲۳۱۲	۲۲۶۹	۱۸۵۹	۱۸۲۰	-۰/۳	۰/۶
آلمان	۲۷۲۸	۲۸۸۸	۲۸۲۵	۲۸۹۴	-۲/۴	۳/۰
ایتالیا	۷۵۸	۶۷۰	۴۵۶	۳۱۳	۲/۲	۴/۸
هلند	۲۴۱	۳۸۵	۵۵۹	۴۵۹	-۳۱/۶	۰/۵
لهستان	۳۹۳	۴۲۱	۳۹۸	۶۳۰	-۱۸/۰	۰/۸
پرتغال	۲۰۲	۲۷۵	۲۹۳	۳۳۸	۵۷/۹	۱/۰
اسپانیا	۹۵۸	۱۲۶۷	۸۰۹	۵۷۵	۱۵/۰	۰/۶
فنلاند	۲۶۷	۳۶۳	۳۶۳	۳۶۳	-۲۹/۱	۱/۰
سوئد	۲۳۸	۲۱۴	۲۱۲	۲۲۷	۶/۶	۰/۴
انگلستان	۱۸۰	۳۰۴	۲۵۳	۳۲۱	۲۶/۲	۰/۵
بقیه اروپا و اوراسیا	۱۱۷۵	۱۲۳۱	۱۲۴۲	۱۲۰۳	-۳/۴	۲/۰
مجموع اروپا و اوراسیا	۱۰۲۸۰	۱۱۱۲۵	۱۰۱۴۳	۱۰۰۲۲	-۱/۵	۱۶/۶

معدل هزار تن نفت خام	۲۰۰۹	۲۰۱۰	۲۰۱۱	۲۰۱۲	تغییرات ۲۰۱۲ نسبت به ۲۰۱۱ (درصد)	درصد از مجموع
مجموع خاورمیانه	-	۴	۴	۴	-	۰
مجموع آفریقا	۱۵	۳۰	۲۳	۲۳	-	۰
استرالیا	۱۷۴	۲۵۱	۲۶۵	۲۵۱	-۵/۶	۰/۴
چین	۱۱۲۴	۱۴۴۱	۱۵۹۷	۱۷۲۹	۸/۰	۲/۹
هند	۱۸۳	۱۶۴	۲۱۰	۲۹۴	۳۹/۹	۰/۵
اندونزی	۴۶۴	۷۱۸	۱۱۰۴	۱۲۱۲	۹/۴	۲/۰
کره جنوبی	۳۴۳	۴۹۱	۲۱۱	۲۱۱	-۰/۳	۰/۴
تایلند	۶۱۸	۶۶۱	۷۲۱	۹۹۴	۳۷/۵	۱/۶
بقیه آسیا و اقیانوسیه	۴۲۲	۳۴۵	۲۸۹	۴۸۳	۶۶/۵	۰/۸
مجموع آسیا و اقیانوسیه	۳۳۲۹	۴۰۷۱	۴۳۹۷	۵۱۷۴	۱۷/۳	۸/۶
مجموع جهان	۵۱۹۸۸	۵۹۴۶۵	۶۰۲۸۶	۶۰۲۲۰	-۰/۴	۱۰۰/۰

فصل سوم - هزینه تولید برق از منابع مختلف انرژی

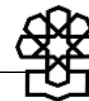
۳-۱. روش تحقیق

روش استفاده شده در این فصل برگرفته از روش ارائه شده توسط مرکز بین‌المللی مطالعات انرژی^۱ است. این متد به عنوان هزینه میانگین چرخه عمر تولید برق شناخته می‌شود. این شیوه یکی از بهترین متدها برای مقایسه هزینه تولید از انواع مختلف تکنولوژی‌های تولید برق است. مدل ارائه شده در این روش بر مبنای هزینه میانگین چرخه عمر است.

۳-۲. هزینه میانگین چرخه عمر

این نوع محاسبه امکان مقایسه تکنولوژی‌ها و منابع مختلف تولید الکتریسیته در طول عمر اقتصادی آنها را پدید می‌آورد. در این روش کلیه هزینه‌ها، چه هزینه‌های سرمایه‌ای و چه هزینه‌های جاری، در نظر گرفته شده و با استفاده از روش نسبت تنزیل در محاسبات به زمان صفر منتقل می‌شود. نرخ تنزیل در این محاسبات ۱۰ درصد در نظر گرفته شده است. همچنین درآمد حاصل از تولید برق نیز به شیوه گفته شده محاسبه و در نظر گرفته شده است. البته باید در نظر داشت که هزینه سرمایه‌گذاری و همچنین قیمت برق در طول زمان در نظر گرفته شده برای تولید برق در مجموعه‌های مختلف ثابت فرض شده است. در این محاسبه فرض شده است که تولید برق در یک

1. IEA



بازار انحصاری با قیمت ثابت تولید و به فروش می‌رسد. در حقیقت این روش مجموع درآمدها و هزینه‌های به روز شده انجام شده در مدت زمان عمر اقتصادی پروژه است. به عبارت دیگر هزینه میانگین چرخه عمر از برابری هزینه‌های به روز شده با درآمدهای به روز شده محاسبه می‌شود. معادله اصلی محاسبات باید این رابطه را بیان کند. محاسبات انجام شده در ادامه به محاسبه هزینه میانگین چرخه عمر برای یک مگاوات ساعت می‌پردازد.

Electricity_t: مجموع تولید الکتریسیته در سال t

P_{Electricity}: قیمت ثابت الکتریسیته

(1+r)^{-t}: نرخ تنزیل برای سال t

Investment: سرمایه‌گذاری در سال t

O&M_t: هزینه تولید و نگهداری در سال t

Fuel_t: هزینه سوخت در سال t

Carbon_t: جریمه تولید گاز گلخانه‌ای

Decommissioning_t: هزینه پایان کار نیروگاه

$$\sum_t (Electricity_t \times P_{Electricity} \times (1+r)^t) = \sum_t ((Investment_t + O \& M_t + Fuel_t + Carbon_t + Decommissioning_t) \times (1+r)^{-t})$$

با چینش مجدد معادله (۱) خواهیم داشت:

(1)

P_{Electricity}=

$$\sum_t ((Investment_t + O \& M_t + Fuel_t + Carbon_t + Decommissioning_t) \times (1+r)^{-t}) / \sum_t (Electricity_t \times (1+r)^{-t})$$

(2)

که برابر است با:

$$LCOE = P_{Electricity} = \sum_t ((Investment_t + O \& M_t + Fuel_t + Carbon_t + Decommissioning_t) \times (1+r)^{-t}) / (\sum_t (Electricity_t \times (1+r)^{-t}))$$

(2)'

هزینه تولید برق از یک منبع انرژی در کشورهای مختلف متفاوت است. این مهم بسته به قیمت سوخت، هزینه سرمایه‌گذاری، نحوه دسترسی به منبع انرژی و... متفاوت است. اما بر مبنای محاسبات مرکز مطالعات انرژی این محاسبات برای میانگین جهانی به صورت جدول زیر بوده است.

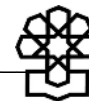
منبع انرژی	هزینه تولید الکتریسیته، (USD/MWh) *
هسته‌ای	۸۴/۷۹۸
زغال سنگ	۹۰/۹۸
گاز طبیعی	۹۰/۵۸
نفت	۱۱۹/۰۳
بادی، دریایی	۱۹۰/۶۵
بادی، خشکی	۱۳۴/۳۵
خورشیدی PV	۵۴۴/۸۲
خورشیدی Thermal	۲۵۶/۷۶
زمین‌گرمایی	۱۲۸/۴۳
آبی	۱۶۱/۰۴
بایومس	۱۳۳/۹۱
بیوگس	۱۱۸/۶۱
امواج	۲۳۳/۰۱
جزرومد	۳۴۷/۹
پیل‌های سوختی	۲۱۳/۱۴

Source: of "Projected Costs Of Generating Electricity", Chapter2, International Energy Agency, 2010.

* دلار بر مگاوات ساعت.

فصل چهارم - خلق مدل بهینه الگوی تولید انرژی

دسترسی به مدل بهینه تولید انرژی و همچنین تعریف نقشه جامع تولید انرژی، همواره یکی از مسائل پربحث بین خبرگان و نخبگان حوزه انرژی بوده است. اینکه هر کشوری از کدام منابع انرژی و به چه میزان استفاده کند تا بیشترین بازده ممکن را داشته باشد از نکات قابل توجه بوده است، اما باید پرسید که در استفاده از منابع انرژی صرف دسترسی به انرژی کفایت کرده و یا عوامل دیگری نیز حائز اهمیت است. به عنوان مثال کشور ایران با داشتن منابع سرشار نفت و گاز قابلیت دسترسی به انرژی ارزان را دارد، اما مشکلات زیست‌محیطی که مصرف این منابع برای کشور ایجاد می‌کند هنگفت است. بدین معنا که هزینه‌های زیست‌محیطی و اکولوژیکی استفاده از این منابع محیط زیست کشور را نه تنها در حال حاضر بلکه تا نسل‌های بعد تهدید می‌کند. ازسوی دیگر منابع طبیعی نفت و گاز منابعی خدادادی است که متعلق به همه نسل‌ها بوده و آیندگان نیز باید از آن بهره ببرند. مضاف بر این با توجه به کاربردهای وسیع مشتقات نفتی در زندگی بشری استفاده از این منابع به عنوان منبع انرژی سوء بهره‌وری از این ثروت است. باید توجه کرد که منابع هیدروکربوری ذخایری تمام‌شدنی است، به هر حال دیر یا زود این منابع به اتمام می‌رسد. با توجه



به این نکته هیچ‌گاه نمی‌توان به این منابع به‌عنوان ذخایر انرژی پایدار نگاه کرد. حال آنکه یکی از عوامل پایه‌ای در توسعه پایدار، دسترسی به منابع انرژی پایدار است. به همین دلیل است که امروز بیش از هر چیز بحران انرژی، توسعه کشورهای توسعه‌یافته را تهدید می‌کند.

با توجه به آنچه گفته شد ضرورت دسترسی به منبع انرژی پایدار و منطبق با محیط زیست ضروری به‌نظر می‌رسد. انطباق با محیط زیست از آن سو اهمیت دارد که بدون داشتن محیط زیستی پایدار برای بشریت باز هم توسعه پایدار معنا پیدا نمی‌کند. گرم شدن زمین به‌دلیل انتشار گازهای گلخانه‌ای حاصل از سوختن سخت‌های فسیلی، حیاط بشر را بر روی کره زمین تهدید می‌کند. به همین منظور به‌نظر می‌رسد که برای رسیدن به منبع انرژی پایدار نه تنها به ماهیت منبع بلکه به تأثیرات زیست‌محیطی نیز باید توجه شود. منابع انرژی تجدیدپذیر مانند بادی و آبی و خورشیدی پاسخی به حل این مشکل است. این منابع انرژی پایدار بوده و با محیط زیست همخوانی دارند. اما هزینه بالای دسترسی به این منابع و همچنین محدودیت‌های مکانی و تکنولوژیکی امکان استفاده از این منابع را محدود می‌کند.

رشد روزافزون نیاز بشر به منبع انرژی ارزان لازمه ایجاد رفاه برای همه بشریت است، اما افزایش هزینه‌های انرژی هزینه سنگینی را به توسعه اقتصاد جهانی وارد خواهد کرد.

حال سؤال اینجاست که چگونه می‌شود به منبعی از انرژی که ارزان، پایدار و سازگار با محیط زیست باشد، دست یافت. مدل پیش رو تلاشی برای پاسخ به این سؤال است. واضح است که منابع انرژی طبیعی درحال حاضر مشخص است. البته ممکن است طی سالیان آینده با توسعه علم و تکنولوژی دسترسی به منابع بی‌پایان ممکن شود اما درحال حاضر این امر ممکن نیست. پس باید از منابع موجود به نحوی استفاده کرد تا منابع انرژی پایدار، ارزان و منطبق با محیط زیست داشت. مدل پیش رو با ارزیابی همه الگوهای مصرف انرژی، الگوی بهینه را با استفاده از روش‌های برنامه‌ریزی خطی ارائه می‌دهد.

فرض کنید که یک کشور دارای منابع گوناگون انرژی از قبیل نفت، گاز، بادی، آبی و خورشیدی است. سؤال اینجاست که از هرکدام از این منابع به چه میزان استفاده کند تا به بهینه الگوی مصرف از نقطه نظر مالی، پایداری و اکولوژیکی (زیستی محیطی) دست یابد. مدل پیش رو این امکان را برای تصمیم‌گیران حوزه انرژی فراهم می‌سازد.

در حقیقت این مدل با تعریف سه ویژگی مالی، پایداری و تأثیرات زیست‌محیطی برای هر یک از منابع انرژی و مقایسه آنها با یکدیگر در یک مدل برنامه‌ریزی خطی، امکان دستیابی به الگوی بهینه مصرف انرژی را فراهم می‌کند. برای رسیدن به این مدل باید دو مرحله کلی گذراند.

مرحله اول - رسم نمودار سه‌بُعدی

این نمودار یک نمودار سه‌بُعدی است که سه ویژگی مالی، پایداری و زیست‌محیطی را برای هریک از منابع انرژی به صورت نقطه مشخص کرده و با ترسیم این نقاط امکان مقایسه بصری را برای همه منابع انرژی فراهم می‌کند. پیش از رسم نمودار لازم است که یک شاخص مشخص در مورد هر یک از این ویژگی‌ها تعریف شود. به عنوان مثال شاخص پایدار برای اندازه‌گیری پایداری یک منبع انرژی و یا شاخص مالی برای اندازه‌گیری میزان هزینه‌بر بودن هر یک از منابع انرژی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

مرحله دوم - تعریف مدل

سپس با استفاده از داده‌های حاصل از نمودار و همچنین مدل برنامه‌ریزی خطی تعریف شده، الگوی بهینه مصرف به صورت اعداد مشخص تولید شود.

۴-۱. ترسیم نمودار

همان‌طور که اشاره شد این نمودار یک نمودار سه‌بُعدی با سه‌محور است که بر روی هر یک از محورها یک ویژگی از سه ویژگی مالی، پایداری و زیست‌محیطی ترسیم می‌شود. به همین منظور پیش از ترسیم نمودار باید برای هر یک از ویژگی‌های مالی، پایداری و زیست‌محیطی یک شاخص تعریف شود.

۴-۱-۱. محور پایداری نمودار

این محور ویژگی پایداری منابع انرژی را ترسیم و مقایسه می‌کند. پیش از مقایسه پایداری باید شاخص پایداری تعریف شود تا بتوان با این شاخص به مقایسه پایداری هریک از منابع انرژی پرداخت.

شاخص پایداری^۱

با توجه به آنچه در فصل دوم گفته شد، نهایت پتانسیل تکنیکی قابل استحصال از هر یک از منابع انرژی تجدیدپذیر در طول مدت یک سال در جدول ۴-۱ آورده شده است.

1. Exajoul Index = 10^{18} joul



جدول ۱-۴. پتانسیل تکنیکی هر یک از منابع انرژی

منبع انرژی	پتانسیل تکنیکی هر یک از منابع انرژی
بادی، دریایی	۲۲
بادی، خشکی	۳۷۹
خورشیدی PV	۱۶۹۳
خورشیدی Thermal	۹۹۲
زمین‌گرمایی	۴۵
آبی	۵۰
بایومس	۵۵
بادی، دریایی	۲۰
جزر و مد	۳۶۰

اما شرایط برای منابع فسیلی متفاوت است. این منابع محدود بوده و با مصرف بیشتر، از حجم این منابع کاسته می‌شود. اما انرژی‌های تجدیدپذیر متفاوتند برای همیشه تا زمانی که خورشید می‌درخشد امکان دسترسی دارند. با این وجود می‌توان منابع فسیلی را نیز پایدار فرض کرد. با این فرض که اگر استفاده از منابع فسیلی محدود شود، می‌توان مدت زمان استفاده از این منابع را طی سالیان آینده افزایش داد. البته این مفهوم به تعریف ما از پایداری بستگی دارد. برخی بر این باورند که پایداری مفهومی پانصد ساله دارد. به این معنی که اگر پانصد سال یک منبع در دسترس باشد پایدار است. به همین منظور اگر ذخایر یک منبع تجدیدپذیر را به ۵۰۰ واحد تقسیم کنیم (عدد حاصل **میزان بیشینه مصرف**^۱ انرژی در یک سال نام دارد) و در هر سال حداکثر از این میزان استفاده کنیم، می‌توان مطمئن بود که این منبع پایدار خواهد ماند. جدول زیر نهایت پتانسیل قابل بهره‌برداری و همچنین نرخ نهایت مصرف را برای هر یک از منابع انرژی نمایش می‌دهد.

البته باید گفت که هیچ تعریف مشخصی از پایداری وجود ندارد. شاید برخی بر این باور باشند که با توسعه سریع علم و تکنولوژی به سرعت منابع جدید جایگزین منابع فعلی انرژی شده و انسان را از نیاز به این منابع فارغ خواهند کرد. به همین دلیل ممکن است بعضی دسترسی انسان به منابع انرژی فسیلی تا صد سال دیگر را عاملی بر پایداری این منبع بدانند. به این ترتیب با در نظر گرفتن تعریف پایداری ۱۰۰ ساله باید ذخایر انرژی فسیلی بر ۱۰۰ واحد تقسیم شود. در نتیجه عدد نرخ بیشینه مصرف (MSR) بزرگ‌تری به دست خواهد آمد که این بیانگر امکان مصرف بیشتر این منابع در مدت زمان کمتر است.

1. Maximum Sustainability Rate (MSR)

در این قسمت مبنای محاسبات براساس پایداری ۵۰۰ ساله است. اما در قسمت‌های بعد به بررسی سناریوهای دیگر خواهیم پرداخت.

$$\text{پتانسیل انرژی (Energy Potential)} = \frac{\text{میزان بیشینه مصرف انرژی برای ۵۰۰ سال}}{۵۰۰ \text{ سال}}$$

به‌عنوان مثال برای انرژی هسته‌ای خواهیم داشت:

$$\text{میزان بیشینه مصرف برای انرژی هسته‌ای} = \frac{۱۱۵ \times ۱۰^{۱۹}}{۵۰۰} = ۲۳۰ \times ۱۰^{۱۶}$$

جدول ۲-۴ نرخ بهینه مصرف انرژی را برای منابع مختلف انرژی نشان می‌دهد.

جدول ۲-۴. نرخ بهینه مصرف انرژی را برای منابع مختلف

منبع	منابع قابل استحصال	میزان بیشینه مصرف انرژی (۵۰۰ سال)
هسته‌ای	۱۱۵×۱۰^{۱۹}	۲۳۰×۱۰^{۱۶}
زغال‌سنگ	۲۱۵×۱۰^{۲۱}	۴۳۰×۱۰^{۱۸}
گاز طبیعی	۵۹۰×۱۰^{۲۱}	۱۱۸×۱۰^{۱۸}
نفت	۸۱۱۱×۱۰^{۲۱}	۱۶۲۲×۱۰^{۱۸}

تا اینجا بیشترین نرخ ممکن استحصال منابع انرژی محاسبه شد، اما هنوز شاخص پایداری ارائه نشده است. واضح آنکه یک شاخص کارآ که بتواند عاملی برای مقایسه منابع مختلف انرژی باشد باید بی‌بُعد بوده تا هر منبعی را با دیگری مقایسه کند. به‌منظور دستیابی به این عدد باید حداکثر انرژی قابل برداشت از یک منبع انرژی به کل انرژی مورد نیاز برای یک سال آن کشور تقسیم شود. حداکثر میزان قابل برداشت انرژی برای منابع تجدیدپذیر همان حداکثر پتانسیل تکنیکی قابل استحصال است که اشاره شد. برای منابع فسیلی همان عدد نرخ بیشینه مصرف است.

به‌عنوان مثال برای محاسبه شاخص پایداری انرژی زیستی برای کل دنیا باید نهایت پتانسیل قابل برداشت سالیانه جهان برای یک منبع انرژی را به کل مصرف انرژی جهان در یک سال تقسیم کنیم. به‌عنوان مثال این عدد برای بایومس به‌صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$\begin{aligned} \text{پتانسیل تکنیکی بایومس} \\ \text{مجموع تقاضای انرژی} \\ \text{شاخص پایداری انرژی برای ۵۰۰ سال} &= \frac{\text{پتانسیل تکنیکی بایومس}}{\text{مجموع تقاضای انرژی}} \\ &= \frac{۵۱۵ \times ۱۰^{۱۹}}{۵۱۹ \times ۱۰^{۲۰}} \\ &= ۰/۰۹۳ \end{aligned}$$



برای محاسبه دقیق‌تر شاخص پایداری بهتر است که انرژی قابل استحصال از منابع تجدیدپذیر در ثابت کارایی نیز ضرب شود. ثابت کارایی بیانگر توان و کارایی یک مجموعه تولید انرژی برای انتقال انرژی پایه به الکتریسیته است. آنگاه عدد حاصل را نهایتاً شاخص پایداری تصحیح شده خواهد بود.

$$(SI_b)^1 = \frac{\frac{5.5 \times 10^{-16} \times 0.85}{5.7 \times 10^{-16}}}{0.78}$$

$$= 0.78$$

جدول ۳-۴ شاخص پایداری را برای هر یک از منابع انرژی نشان می‌دهد.

جدول ۳-۴. شاخص پایداری برای هر یک از منابع انرژی

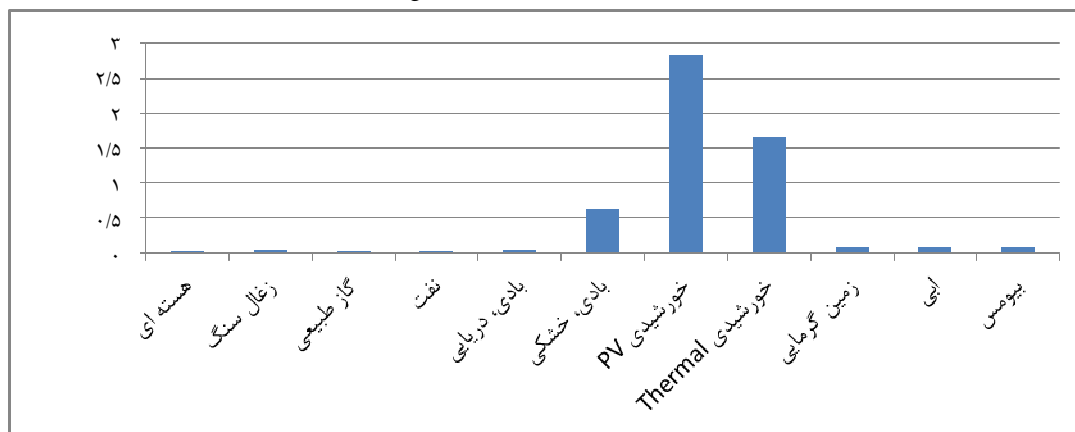
منبع انرژی	پایداری (EJ/Y)	شاخص کارایی (درصد)	پتانسیل انرژی (J)	پتانسیل انرژی اصلاح شده (J)	شاخص پایداری (J)
هسته‌ای		۸۵	1.5×10^{16}	1.47×10^{16}	6.26×10^{-5}
زغال‌سنگ		۴۵	2.5×10^{16}	1.13×10^{16}	0.027
گاز طبیعی		۵۵	5.9×10^{16}	2.26×10^{16}	0.1
نفت		۳۵	8.1×10^{16}	2.8×10^{16}	0.09
بادی، دریایی	۲۲	۳۴	2.2×10^{16}	7.48×10^{16}	0.036
بادی، خشکی	۳۷۹	۲۷	2.79×10^{16}	1.02×10^{16}	0.063
خورشیدی PV	۱۶۹۳	۱۵	1.9×10^{16}	2.53×10^{16}	2.82
خورشیدی Thermal	۹۹۲	۳۳	9.92×10^{16}	2.27×10^{16}	1.65
زمین گرمایی	۴۵	۸۰	4.5×10^{16}	2.6×10^{16}	0.075
آبی	۵۰	۵۰	5×10^{16}	2.5×10^{16}	0.083
بایومس	۵۵	۸۵	5.5×10^{16}	4.67×10^{16}	0.078

در جدول ۳-۴ ستون دوم از جدول ۱-۴ استخراج شده است. ستون سوم بر مبنای گزارش‌های مرکز مطالعات انرژی استخراج شده و ستون چهارم از جداول ۱-۴ و ۲-۴ استخراج شده است. ستون پنجم از ضرب ستون چهارم و پنجم محاسبه شده است. نهایتاً ستون ششم از تقسیم ستون پنجم به کل مصرف جهانی انرژی که از گزارش‌های مرکز مطالعات انرژی در سال ۲۰۱۲ به دست آمده است، محاسبه می‌شود.

کاربرد شاخص پایداری انرژی

کاربرد ابتدایی این شاخص آن است که امکان مقایسه بین منابع مختلف انرژی را فراهم می‌کند. نمودار ۱-۴ شاخص پایداری را برای منابع مختلف انرژی جهان مقایسه کرده است. همان‌طور که از نمودار ۱-۴ مشخص است انرژی خورشیدی پایدارترین منبع انرژی و انرژی هسته‌ای ناپایدارترین منبع انرژی است.

نمودار ۱-۴. مقایسه شاخص پایداری برای منابع مختلف انرژی جهان



یکی دیگر از کاربردهای مهم شاخص پایداری ارائه امکان محاسبه میزان پایداری انرژی در یک کشور است. این شاخص این امکان را می‌دهد تا با بررسی و محاسبه شاخص پایداری برای همه منابع انرژی به بررسی پایداری انرژی به صورت کلی برای یک کشور پرداخت. به این منظور ابتدا شاخص پایداری را برای همه منابع انرژی یک کشور محاسبه کرده و سپس مجموع این شاخص‌ها محاسبه می‌شود. اگر این مجموع بیشتر از ۱ بود نشان می‌دهد که این کشور از لحاظ انرژی پایدار بوده و حتی می‌تواند مازاد نیاز خود را تا آنجا که به پایداری داخلی انرژی لطمه نخورد صادر کند. اگر این مجموع برابر یک بود بیانگر پایدار بودن انرژی در این کشور است اما توان صادرات یا نیاز واردات به انرژی وجود ندارد. اما اگر این عدد کوچکتر از یک باشد کشور مورد نظر هیچگاه به پایداری انرژی نخواهد رسید و همواره برای تأمین انرژی خود نیازمند دیگر کشورها می‌باشد.

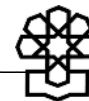
مجموع شاخص پایدار $\sum SI_X$

کشور از نظر تأمین انرژی پایدار است $\sum SI_X = 1$

کشور از نظر تأمین انرژی پایدار است و ظرفیت صادرات نیز دارد $\sum SI_X > 1$

کشور از نظر تأمین انرژی پایدار نیست $\sum SI_X < 1$

البته باید توجه داشت که یک کشور با مجموع شاخص پایداری بیشتر یا مساوی یک از لحاظ تئوری از دیگر کشورها بی‌نیاز است. اما ممکن است به دلایل اقتصادی، سیاسی و یا دلایل دیگر اقدام به واردات یا سوآپ انرژی کند.



برمبنای جدول ۳-۴ مجموع شاخص پایداری با احتساب ۵۰۰ سال پایداری برای کل جهان برابر ۵/۴۵ واحد است. که این موضوع بیانگر پایدار بودن منابع موجود انرژی جهان به منظور استفاده بیشتر بشر است.

۴-۱-۲. محور زیست محیطی

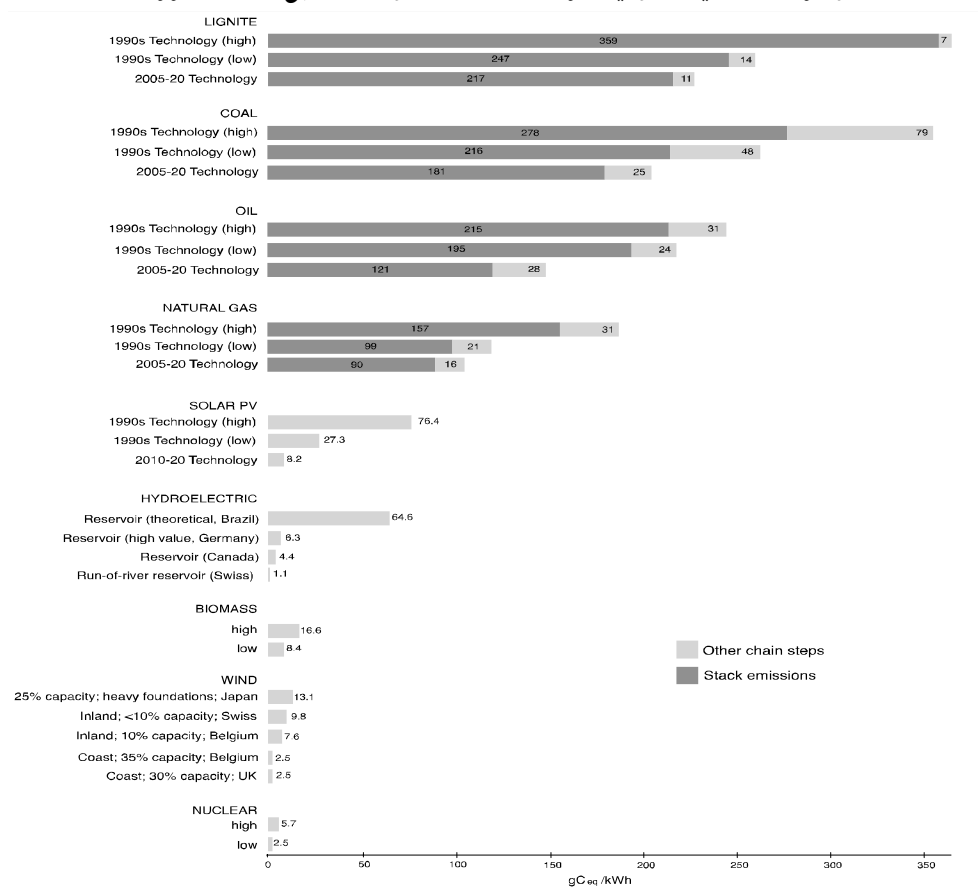
در محور دوم نمودار موردنظر محاسبه تأثیر هر یک از منابع انرژی بر محیط زیست مدنظر است. همانند محور پایداری، برای رسم محور زیست محیطی نیازمند تعریف و محاسبه شاخص‌های مربوط به ویژگی زیست محیطی منابع انرژی هستیم.

شاخص دشمنی زیست محیطی^۱ (شاخص زیست محیطی)

همان‌طور که اشاره شد تولید الکتریسیته از همه منابع انرژی کم یا زیاد تأثیر مخربی بر محیط زیست خواهد داشت که مهمترین این مشکلات تأثیرات ناشی از تولید گازهای گلخانه‌ای است. به همین دلیل از دیگر مضرات این منابع صرفنظر کرده و تنها میزان تولید دی‌اکسیدکربن را به عنوان شاخص مقایسه تأثیر منابع انرژی بر محیط زیست برخواهیم شمرد. همان‌طور که اشاره شد همه منابع انرژی حتی منابع تجدیدپذیر در مراحل ساخت تجهیزات، نصب و گسترش، مانند منابع فسیلی تولید گاز گلخانه‌ای دارند. به منظور خلق یک شاخص زیست محیطی عامل تولید گاز گلخانه‌ای بهترین گزینه است. مطالعات متفاوتی برای محاسبه فاکتور آلاینده‌گی برای منابع مختلف انرژی صورت گرفته است. عمده نتایج برمبنای تولید میزان دی‌اکسیدکربن، متان، اکسیدنیترژن و... براساس هر گرم کربن است. نمودار ۲-۴ به مقایسه فاکتور آلاینده‌گی برای منابع مختلف انرژی می‌پردازد.

1. Environmental Enemy Index (EEI)

نمودار ۲-۴. مقایسه تولید گازهای گلخانه‌ای توسط منابع مختلف انرژی



Source: “Greenhouse Gas Emission Of Electricity Generation Chains Assessing The Differences”, Joseph V. Spadaro, IAEA Bulletins, 2000.

جدول ۴-۴ میزان متوسط تولید گازهای گلخانه‌ای را برای هر کیلووات ساعت برای هریک از منابع انرژی نمایش می‌دهد. این عدد از میانگین تکنولوژی‌های مختلف در زمان‌های مختلف در کشورهای مختلف بر مبنای نمودار ۲-۴ محاسبه شده است. این عدد فاکتور آلاینده‌گی را برای هریک از منابع انرژی نشان می‌دهد. فاکتور آلاینده‌گی میزان تولید گاز گلخانه‌ای را برای تولید یک کیلووات ساعت نشان می‌دهد.



جدول ۴-۴. فاکتور آلاینده‌گی برای هریک از منابع انرژی

منبع انرژی	فاکتور آلاینده‌گی	واحد
لیگنایت	۲۲۸	گرم کربن / کیلووات ساعت
زغال سنگ	۲۷۵/۶۶	گرم کربن / کیلووات ساعت
نفت خام	۲۰۴/۶۶	گرم کربن / کیلووات ساعت
گاز طبیعی	۱۳۸	گرم کربن / کیلووات ساعت
خورشیدی	۱۸/۶۵	گرم کربن / کیلووات ساعت
آبی	۱۹/۱	گرم کربن / کیلووات ساعت
بادی	۷/۰۶	گرم کربن / کیلووات ساعت
بیومس	۱۲/۵	گرم کربن / کیلووات ساعت
هسته‌ای	۴/۱	گرم کربن / کیلووات ساعت
زمین گرمایی	۱۴/۳۲۵	گرم کربن / کیلووات ساعت

همان‌طور که اشاره شد یک شاخص کارآ باید بدون بُعد باشد. اعداد جدول بالا یکسری عدد با واحد گرم کربن بر کیلووات ساعت است. برای رسیدن به یک شاخص باید واحد این اعداد را حذف کرد. به این منظور دو گام طی می‌شود:

گام اول

در گام اول ابتدا حجم دی‌اکسیدکربن تولیدی ناشی از یک منبع خاص برای تولید انرژی مورد نیاز یک سال جهان محاسبه شود. به این معنی که فرض می‌شود اگر جهان تنها از یک منبع خاص مثل نفت برای تولید انرژی استفاده کند به چه میزان گازهای گلخانه‌ای تولید خواهد کرد. به این منظور فاکتور آلاینده‌گی این منبع باید در انرژی مورد مصرف جهان ضرب شود. به‌عنوان مثال فاکتور آلاینده‌گی گاز ۱۳۸ گرم کربن بر کیلووات ساعت است که با ضرب این عدد در مجموع مصرف انرژی جهانی که عددی بالغ بر $1.0^{17} \times 1/66195$ کیلووات ساعت است، آنگاه مجموع دی‌اکسیدکربن تولیدی ناشی از منبع گاز محاسبه می‌شود.

= میزان آلاینده‌گی احتمالی ایجاد شده اگر تنها گاز طبیعی به‌عنوان تنها منبع انرژی مصرفی جهان در سال ۲۰۱۱ استفاده می‌شد

$$138(\text{grc/kwh}) \times 1/66 \times 1.0^{17}(\text{kwh}) = 2/29 \times 1.0^{19}(\text{grc})$$

از آنچه که ما در مورد پایداری صحبت می‌کنیم پس باید مدت زمان بیشتری را در نظر بگیریم. به همین منظور با فرض اینکه ظرفیت لازم برای همه منابع انرژی وجود دارد بازه زمانی در نظر گرفته شده را به ۱۰۰ سال افزایش می‌دهیم. عدد به‌دست آمده را عدد حجم آلاینده‌گی^۱ می‌نامیم.

$$\begin{aligned} \text{عدد حجم آلاینده‌گی برای گاز طبیعی} &= 2/29 \times 10^{19} \times 100 = 2/29 \times 10^{21} \text{ grc} \\ &= \frac{2/29 \times 10^{21}}{10^6} = 2/29 \times 10^{15} \text{ tone carbon} \end{aligned}$$

جدول ۴-۵ حجم آلاینده‌گی را برای همه منابع انرژی نمایش می‌دهد.

جدول ۴-۵. مقایسه عدد حجم آلاینده‌گی برای منابع مختلف

منبع انرژی	عدد حجم آلاینده‌گی
لیگنایت	$2/78 \times 10^{15}$
زغال سنگ	$2/58 \times 10^{15}$
نفت خام	$2/60 \times 10^{15}$
گاز طبیعی	$2/29 \times 10^{15}$
خورشیدی	$2/09 \times 10^{19}$
آبی	$2/17 \times 10^{19}$
بادی	$1/17 \times 10^{19}$
بیومس	$2/07 \times 10^{19}$
هسته‌ای	$6/81 \times 10^{17}$
زمین گرمایی	$2/38 \times 10^{19}$

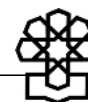
گام دوم

در گام دوم باید محاسبه شود که این میزان آلاینده‌گی چه میزان بر محیط زیست جهان تأثیرگذار است. به همین منظور اعداد حجم آلاینده‌گی باید به وزن اتمسفر تقسیم شود. وزن اتمسفر از مسیر زیر محاسبه می‌شود.

فشار اتمسفر در سطح دریا برابر ۱۴,۵ پوند بر اینچ مربع است که این عدد معادل ۱۰ تن بر مترمربع می‌باشد. این فشار ناشی از تأثیر جو در این ناحیه می‌باشد. مساحت زمین برابر ۴۴۱۰۰۰ میلیارد مترمربع خواهد بود.

بنابراین وزن اتمسفر اطراف زمین از ضرب ۱۰ تن بر مترمربع در مساحت ۴۴۱۰۰۰ میلیارد مترمربعی زمین محاسبه می‌شود. که این عدد رقمی برابر ۴۴۱۰۰۰۰ میلیارد تن خواهد شد. حال برای خلق شاخص مورد نظر عدد حجم آلاینده‌گی باید به وزن اتمسفر تقسیم شود.

$$\begin{aligned} \text{شاخص زیست محیطی برای گاز طبیعی} &= \frac{2/29 \times 10^{15} (\text{tone})}{441 (\text{million billion tons})} \\ &= 51/98 \end{aligned}$$



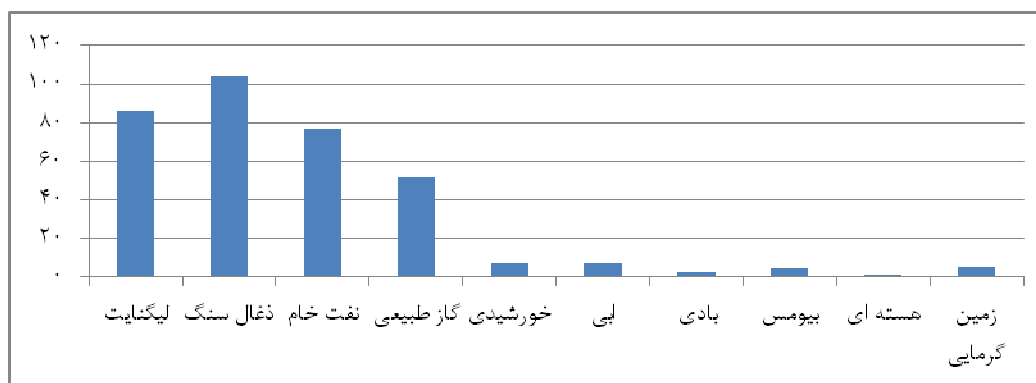
جدول ۶-۴ شاخص زیست‌محیطی را برای هریک از منابع انرژی نشان می‌دهد.

جدول ۶-۴. شاخص زیست‌محیطی برای منابع مختلف

منبع انرژی	عدد حجم آلاینده‌گی	شاخص زیست‌محیطی
لیگنایت	378×10^{15}	۸۵/۸۸
زغال‌سنگ	658×10^{15}	۱۰۳/۸۳
نفت خام	340×10^{15}	۷۷/۰۹
گاز طبیعی	229×10^{15}	۵۱/۹۸
خورشیدی	309×10^{16}	۷/۰۲
آبی	317×10^{16}	۷/۱۹
بادی	117×10^{16}	۲/۶۵
بایومس	47×10^{16}	۴/۷۰
هسته‌ای	681×10^{13}	۱/۵۴
زمین گرمایی	228×10^{16}	۵/۳۹

برای مقایسه بهتر این شاخص شکل زیر به مقایسه نموداری شاخص زیست‌محیطی پرداخته است. با توجه به نمودار زیر زغال‌سنگ بیشترین تأثیر را بر محیط زیست داشته و انرژی هسته‌ای کمترین تأثیر را دارد.

نمودار ۳-۴. مقایسه شاخص زیست‌محیطی برای منابع مختلف انرژی جهان



۳-۱-۴. محور مالی

تا اینجا اطلاعات مربوط به دو محور پایداری و زیست‌محیطی تهیه شد. حال نوبت به محور مالی می‌رسد. شاید برخی از منابع انرژی از ظرفیت بالایی برخوردار باشند، اما به دلیل هزینه بالا امکان جایگزین شدن با منابع ارزان‌تر موجود را ندارند و در زمان موجود که اقتصاد جهانی در حال توسعه در همه کشورها به‌ویژه کشورهای در حال توسعه است، دسترسی به انرژی ارزان از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد. هرچه هزینه انرژی بیشتر شود هزینه تولید و زندگی بیشتر شده و در

نتیجه امکان توسعه و ایجاد رفاه برای همه بشریت کاهش می‌یابد. به همین دلیل فاکتور هزینه در محاسبات فوق‌العاده حائز اهمیت است. در اینجا نیز مانند دو محور گذشته ابتدا باید شاخص مالی تهیه شود.

شاخص مالی^۱

همان‌طور که در فصل سوم گفته شد میزان هزینه اصلاح شده تولید برای هر مگاوات ساعت توسط مرکز مطالعات انرژی تهیه شده است. جدول زیر نتیجه این محاسبات را برای هریک از منابع انرژی نمایش می‌دهد.

جدول ۷-۴. هزینه تولید یک مگاوات ساعت از منابع مختلف انرژی

منبع انرژی	هزینه تولید الکتریسیته (Mwh)
هسته‌ای	۸۴/۷۹۸
زغال‌سنگ	۹۰/۹۸
گاز طبیعی	۹۰/۵۸
نفت	۱۱۹/۰۳
بادی، دریایی	۱۹۰/۶۵
بادی، خشکی	۱۳۴/۳۵
خورشیدی PV	۵۴۴/۸۲
خورشیدی Thermal	۲۵۶/۷۰
زمین‌گرمایی	۱۲۸/۴۳
آبی	۱۶۱/۰۴
بایومس	۱۳۳/۹۱
بیوگس	۱۱۸/۶۱
امواج	۲۳۳/۰۱
جزر و مد	۳۴۷/۹
سلول‌های سوختی	۲۱۳/۱۴

در این بخش نیز برای تهیه یک شاخص کارآ باید گام‌های زیر طی شود:

گام اول

برای گام اول باید اعداد حاصل از جدول ۷-۴ در میزان انرژی سالیانه مورد نیاز جهان ضرب شود. عدد به‌دست آمده بیانگر میزان سرمایه مورد نیاز برای تأمین همه نیاز انرژی بشر از یک منبع خاص است. این عدد بیشینه سرمایه مورد نیاز^۲ نامیده می‌شود. واحد عدد به‌دست آمده دلار

1. Financial Index (FI)

2. Maximum Financial Required (MFR)



است.

گام دوم

برای به دست آوردن یک شاخص بی بُعد و معنادار عدد بیشینه سرمایه مورد نیاز باید به DPG سالیانه جهان تقسیم شود. عدد به دست آمده شاخص مالی است. به عنوان مثال برای محاسبه شاخص مالی در مورد گاز طبیعی خواهیم داشت:

$$\frac{(USD)}{(Mwh)} \text{ هزینه تولید گاز طبیعی} \times \text{انرژی مورد نیاز سالیانه جهان} = \text{عدد بیشینه سرمایه مورد نیاز گاز طبیعی} (MFR)$$

$$= \frac{90/58 (USD)}{(Mwh)} \times 1166 \times 10^{12} Mwh$$

$$= 10/50 \times 10^{16} USD$$

$$\text{شاخص مالی گاز طبیعی} = \frac{MFR}{GDP \text{ جهان}}$$

$$= \frac{10/50 \times 10^{16} (USD)}{826 \times 10^{12} (USD)}$$

$$= 24/03 \times 10^2$$

به منظور ساده سازی محاسبات از ضریب 10^2 اعداد چشم پوشی شده است. جدول ۸-۴

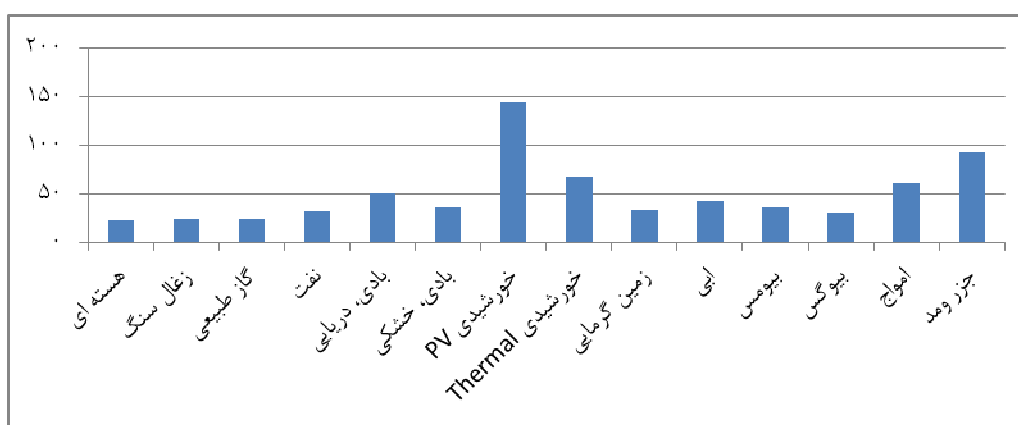
شاخص مالی را برای منابع مختلف انرژی نمایش می دهد.

جدول ۸-۴. شاخص مالی برای منابع مختلف انرژی

منبع انرژی	هزینه مقایسه ای تولید الکتریسیته	شاخص مالی
هسته ای	۸۴/۷۹۸	۲۲/۵۰
زغال سنگ	۹۰/۹۸	۲۴/۱۴
گاز طبیعی	۹۰/۵۸۶	۲۴/۰۳
نفت	۱۱۹/۰۳	۳۱/۵۸
بادی، دریایی	۱۹۰/۶۵	۵۰/۵۸
بادی، خشکی	۱۳۴/۳۵	۳۵/۶۵
خورشیدی PV	۵۴۴/۸۲	۱۴۴/۵۶
خورشیدی Thermal	۲۵۶/۷۰	۶۸/۱۱
زمین گرمایی	۱۲۸/۴۳	۳۴/۰۷
آبی	۱۶۱/۰۴	۴۲/۷۳
بایومس	۱۳۳/۹۱	۳۵/۵۳
بیوگس	۱۱۸/۶۱	۳۱/۴۷
امواج	۲۳۳/۰۱	۶۱/۸۲
جزر و مد	۳۴۷/۹	۹۲/۳۱

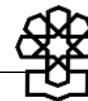
برای درک بهتر مقایسه منابع مختلف انرژی نمودار ۴-۴ به مقایسه این شاخص به صورت ترسیمی پرداخته است. طبق این نمودار انرژی خورشیدی گران‌ترین و انرژی هسته‌ای ارزان‌ترین منبع انرژی موجود می‌باشند. طبق نمودار ۴-۴ انرژی خورشیدی فتوولتائیک گران‌ترین منبع تولید انرژی بوده و انرژی هسته‌ای ارزان‌ترین منبع تولید انرژی است.

نمودار ۴-۴. مقایسه مالی انواع مختلف انرژی

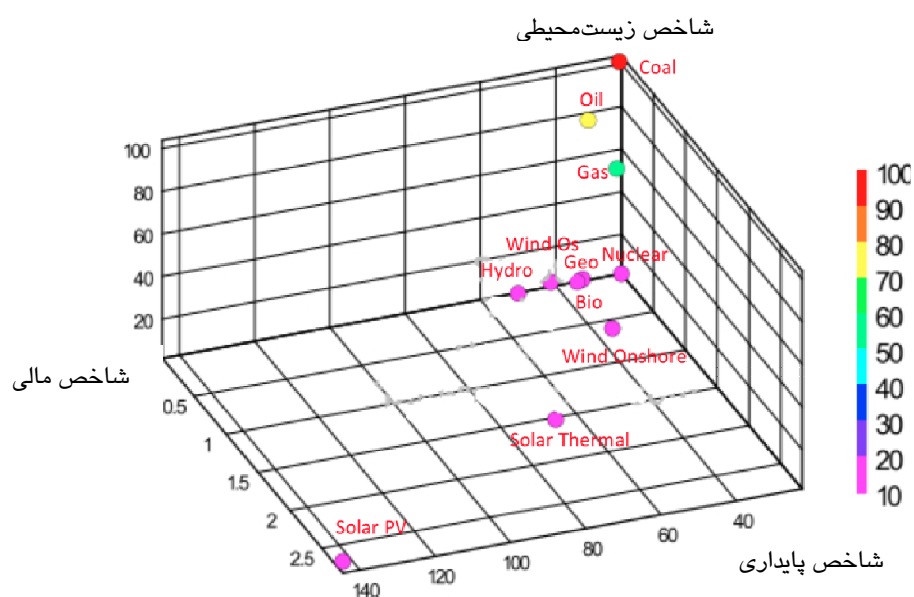


۴-۲. رسم نمودار

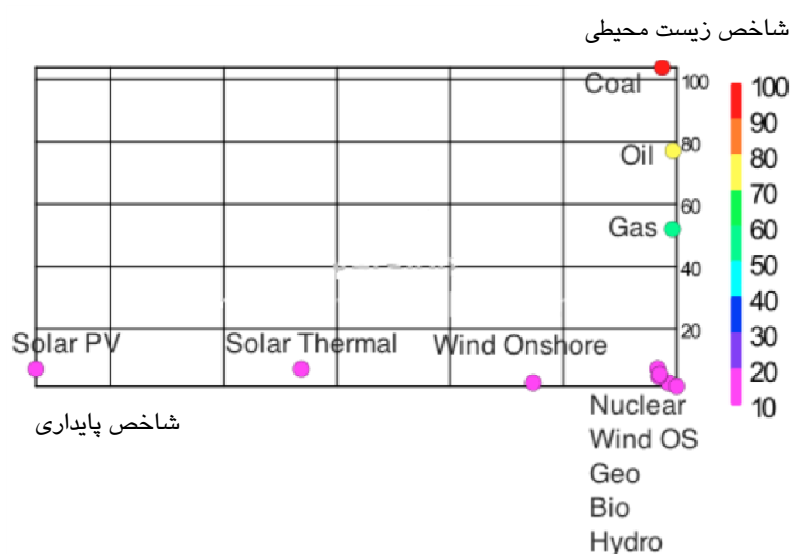
با تکمیل هر سه محور نمودار امکان ترسیم کامل این نمودار سه وجهی فراهم شده است. سه محور این نمودار عبارتند از: محورهای مالی، پایداری و دشمن زیست محیطی که به اختصار شاخص زیست محیطی نامیده می‌شود. این نمودار امکان مقایسه ویژگی‌های گفته شده در یک شکل را فراهم می‌کند. نمودار ۴-۱ به مقایسه سه بعدی منابع مختلف تولید انرژی پرداخته است. نمودار ۴-۲ و ۴-۳ ۴ نماهای دوبعدی از این نمودار سه بعدی هستند. همان‌طور که نمودارها نشان می‌دهند، منابع فسیلی که رایج‌ترین منابع انرژی جهان امروز هستند ارزان‌تر از بقیه منابع اما بسیار ناپایدارند و شاخص زیست محیطی آنها بسیار بالاست. بدین معنا که تخریبات زیست محیطی زیادی دارند. منابع خورشیدی بسیار پایدار اما پرهزینه‌اند. حال سؤال اینجاست که چه میزان از هریک از منابع انرژی استفاده شود تا بهینه الگوی تولید ایجاد شود؟ در بخش بعد با خلق یک مدل برنامه‌ریزی خطی این سؤال پاسخ داده خواهد شد.



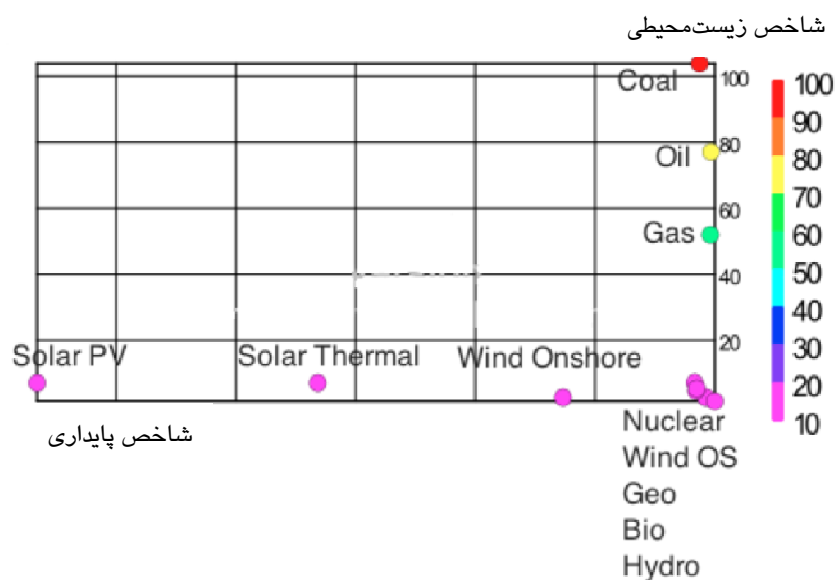
نمودار ۴-۵. مقایسه سه شاخص پایداری، مالی و زیست محیطی



نمودار ۴-۶. مقایسه شاخص پایداری و شاخص محیطی



نمودار ۴-۷. مقایسه شاخص مالی و شاخص پایداری



۴-۳. خلق مدل

با ایجاد شاخص‌های موردنظر اکنون زمان ایجاد یک مدل بهینه است. همان‌طور که در نمودار دیده می‌شود برخی از منابع انرژی مانند انرژی الکتریسیته حاصل از نیروگاه‌های گازی ارزان‌تر از بقیه بوده و از آلاینده‌گی کمتری نسبت به منابع فسیلی دیگر برخوردار است. اما به دلیل محدود بودن این منابع، نمی‌توان آن را منبع انرژی پایدار دانست. از سوی دیگر انرژی خورشیدی منبع انرژی نامحدود، پایدار و پاک است اما به دلیل گران‌قیمت بودن و برخی از محدودیت‌های تکنیکی قابلیت تبدیل شدن به منبع اصلی انرژی بشر حداقل در کوتاه‌مدت را ندارد. همان‌طور که مشهود است شاید بتوان چند هزار هزار الگوی مختلف از درصدهای مختلف استفاده از منابع گوناگون انرژی ترسیم کرد. حال سؤال اصلی اینجاست که چه میزان از هریک از منابع استفاده شود تا بهینه نقشه یا الگوی مصرف انرژی به دست آید. مدل پیش رو دقیقاً وسیله‌ای برای پاسخ به این سؤال است. این مدل با استفاده از متدهای برنامه‌نویسی خطی اقدام به تهیه مدل و حل آن خواهد کرد.

۴-۳-۱. پیش‌فرض‌های مدل

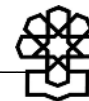
برای دستیابی به هر مدلی حتماً باید یکسری پیش‌فرض‌های ساده‌کننده در نظر گرفته شود. البته تغییر هر کدام از این پیش‌فرض‌ها می‌تواند نسخه جدیدی از این مدل باشد. پیش‌فرض‌های در نظر گرفته شده در این مدل عبارتند از:

(الف) فرض شده تمام مصرف انرژی بشر به صورت الکتریسیته است. این منابع برای مصرف باید به انرژی الکتریکی تبدیل شوند. به عنوان مثال انرژی مصرفی در حمل و نقل و مصارف خانگی و صنعتی همه از طریق نیروی برق خواهد بود. البته با توجه به اینکه محاسبات برای ایجاد یک الگوی هدف بلندمدت است و با توجه به اینکه بهترین گزینه تولید و انتقال و مصرف انرژی الکتریسیته می‌باشد. فرض مربوط خالی از محتوا نیست، زیرا با پیشرفت خودروهای الکتریکی در چند سال آینده بخش حمل و نقل نیز به سمت استفاده از برق حرکت خواهد کرد.

(ب) فرض شده میزان تقاضا برای انرژی در طول مدت محاسبات در نظر گرفته شده برای مدل ثابت خواهد بود. بدین معنا که مصرف بشر در طی سال‌های آینده کاهش یا افزایش نخواهد داشت.

(ج) فرض شده پیشرفت تکنولوژی برای انرژی در طول مدت در نظر گرفته شده برای مدل چشمگیر نخواهد بود. بدین معنا که پیشرفت تکنولوژی تأثیری بر بازدهی، بهره‌وری و افزایش توان تکنولوژی‌های مختلف تولید برق نخواهد داشت.

(د) فرض شده تغییر قیمت محسوس برای منابع انرژی در طول مدت در نظر گرفته شده برای مدل رخ نخواهد داد.



عامل اصلی تعیین قیمت نسبت عرضه و تقاضاست. واضح است که با توجه به رشد اقتصاد جهانی، میزان جمعیت و افزایش سطح رفاه جهانی میزان تقاضا برای منابع انرژی افزایش چشمگیری خواهد داشت. اما از دیگر سو با افزایش توان تکنولوژیکی بشر توانایی بهره‌برداری از منابع انرژی نیز افزایش می‌یابد. بدین معنا که با وجود پیش‌فرض‌های «ب» و «ج» پیش‌فرض «د» دور از ذهن نیست. یعنی هر سه پیش‌فرض در یک راستا حرکت کرده و در نتیجه به دقت مدل کمک خواهند کرد.

۲-۳-۴. مقدمه‌ای بر مدل

برای دستیابی به مدل بهینه باید ابتدا یک مدل برنامه‌ریزی خطی خلق شود تا با حل این مدل الگوی بهینه مصرف منابع انرژی تهیه شود. مدل‌های برنامه‌ریزی خطی از یک معادله اصلی و چندین معادله و نامعادله محدودکننده تشکیل می‌شوند. به‌منظور فهم بهتر موضوع باید در نظر گرفت که مثلاً در یک فضای دو بُعدی معادله اصلی به‌صورت یک خط بوده و نامعادلات به‌صورت خطوط محدودکننده به محدود کردن فضای محتمل می‌پردازند. در نهایت کمینه یا بیشینه نقاط به‌دست آمده از تلاقی نقاط به‌عنوان پاسخ در نظر گرفته می‌شود.

با افزایش تعداد متغیرها، فضا و ابعاد مورد محاسبه نیز افزایش می‌یابد. در مورد مدل انرژی با توجه به اینکه در محاسبات ۱۱ منبع مختلف انرژی در نظر گرفته شده است به همین دلیل فضای مورد محاسبه این مدل یک فضای ۱۱ بعدی است. برای دستیابی به پاسخ دقیق‌تر هرچه تعداد معادلات محدودکننده بیشتر باشد و فضای محتمل کاهش یابد نتیجه دقیق‌تر خواهد بود. در این بخش از نرم‌افزار Solver برای حل معادلات استفاده شده است.

به‌منظور دستیابی به معادله اصلی یادآوری این نکته ضروری است که هدف از این مدل به‌دست آوردن بهینه الگوی مصرف است. طبق اولین پیش‌فرض مدل بهینه تولید باید یک الگوی پایدار ارائه دهد. یعنی مجموع شاخص پایداری باید برابر با یک باشد. برای تبدیل این موضوع به زبان ریاضی خواهیم داشت:

$$\sum_{i=1}^n x_i = 1$$

در معادله بالا x ها درصدی از شاخص پایداری برای هریک از منابع انرژی هستند. معادله بالا به‌عنوان تابع هدف مدل در نظر گرفته می‌شود. به‌منظور حل یک معادله خطی، باید با طرح چندین معادله و نامعادله به محدودسازی فضای احتمال معادله اصلی پرداخت. به‌منظور دسترسی به جواب‌های مشخص باید فضای احتمالی معادله اصلی را به‌صورت مشخص محدود کرد. همان‌طور که اشاره شد در طراحی الگوی بهینه مصرف انرژی سه عنصر مالی، پایداری و محیط زیست

بسیار مهم هستند. به عبارت دیگر همان‌طور که در نمودار نشان داده شد در تهیه مدل، این سه موضوع نقش اصلی ایفا می‌کنند. به همین منظور باید با این سه موضوع به محدودسازی فضای احتمالی پرداخت. اولین معادلات محدودکننده به منظور اعمال محدودیت پایداری است. واضح است که میزان استفاده از هریک از منابع در یک سال (X) که به عنوان درصدی از شاخص پایداری بیان شد نباید بیشتر از شاخص پایداری باشد. واضح است زمانی که شاخص پایداری برای یک منبع انرژی در یک کشور مثلاً $0/2$ است میزان X برای آن منبع بیشتر از $0/2$ نمی‌تواند باشد. به همین دلیل برای هریک از منابع انرژی رابطه زیر به عنوان یک محدودیت باید در نظر گرفته شود.

$$0 \leq X_i \leq SI_i$$

SI_i = شاخص پایداری بر منبع انرژی i در یک کشور

X_i = درصد استفاده از منبع انرژی در الگوی بهینه

به عنوان مثال در محاسبات ما ۱۱ منبع انرژی در نظر گرفته شده است. به همین دلیل ۱۱ معادله محدودیت به تعداد منابع انرژی در نظر گرفته می‌شود.

به علاوه به منظور اعمال محدودیت پایداری برای تأمین منابع انرژی محدودیت زیر نیز اعمال می‌شود.

$$X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_n = 1$$

برای اعمال شاخص مالی باید در نظر گرفت که اقتصاد یک کشور چه میزان توانایی و پتانسیل هزینه در بخش تولید انرژی را دارد. به هر میزان که یک اقتصاد توانمندتر باشد، بیشتر می‌تواند به سمت انرژی‌های نو با هزینه بیشتر حرکت کند. هرچه یک اقتصاد ضعیف‌تر باشد بیشتر به سمت انرژی‌های ارزان‌تر که اغلب فسیلی هستند حرکت می‌کند. لذا باید حداکثر توان یک اقتصاد برای سرمایه‌گذاری در حوزه انرژی محاسبه شده و به عنوان محدودیت در فضای نمونه مورد محاسبات قرار گیرد. این عدد می‌تواند محاسبه شده و یا از طریق یک مطالعه محتوایی با توجه به نظر کارشناسان و سیاستگذاران محاسبه شود. این عدد به عنوان شاخص مالی مطلوب ($FI_{desired}$) در مدل اعمال می‌شود. این بدین معناست که یک کشور چه میزان از درآمد خود را می‌تواند صرف تولید انرژی کند. به وسیله معادله زیر فضای معادله اصلی از نقطه نظر مالی محدود می‌شود.

$$0 \leq \sum FI_x \times X_i \leq FI_{desired}$$

X_i = درصد استفاده از منبع انرژی i

FI_x = شاخص مالی برای منبع انرژی X

$FI_{desired}$ = شاخص مالی مطلوب



و به همین ترتیب مدیران یک کشور در مورد میزان تأثیر و تخریب ناشی از انرژی بر محیط زیست تصمیم می‌گیرند که چه اندازه محیط زیست دستخوش تأثیرات ناشی از تولید انرژی باشد. همانند شاخص مالی مطلوب شاخص زیست‌محیطی مطلوب باید از طریق یک مطالعه محتوایی تخمین زده شود: معادله زیر این تأثیر را در محدوده فضای احتمالی ایجاد می‌کند:

$$0 \leq \sum EEI_x \times X_i \leq EEI_{desired}$$

EEI_x = شاخص زیست‌محیطی برای منبع انرژی X

$EEI_{desired}$ = شاخص زیست‌محیطی مطلوب

فصل پنجم - حل مدل

به‌منظور فهم بهتر حل مدل، مدل را برای همه جهان حل می‌کنیم تا الگوی بهینه مصرف برای تمام جهان محاسبه شود. اما با توجه به اینکه FI (شاخص مالی)^۱ و EEI (شاخص زیست‌محیطی)^۲ مطلوب اختیاری بوده و همچنین تعریف مدت زمان پایداری برای منابع انرژی متفاوت می‌باشد، از همین رو باید چندین سناریوی مختلف برای حل این مطالعه انتخاب شود. به همین دلیل ۶ سناریوی مختلف برای تعریف پایداری انتخاب می‌شود یعنی از وضعیت موجود تا ۵۰۰ سال، هر یک با گام‌های صدساله. بدین ترتیب سناریوهای مختلف از وضعیت موجود تا پانصد سال آینده با قدم‌های صدساله در نظر گرفته می‌شود. به‌عنوان مثال در یک سناریو پایداری ۲۰۰ سال فرض شده است. این یعنی اینکه از منابع فسیلی به‌گونه‌ای استفاده شود که تا ۲۰۰ سال در دسترس باشند. هر مدل‌سازی در دو مرحله اجرا می‌شود. در مرحله اول، IEE مطلوب معادل وضعیت موجود آن در نظر گرفته می‌شود. بقیه محدودیت‌ها معادل آنچه گفته شد در نظر گرفت می‌شود. این بدین معناست که هیچ محدودیتی برای FI ایجاد نمی‌شود. با به اجرا در آوردن مدل اولین سهم‌ها (X) برای هر یک از منابع انرژی‌ها محاسبه می‌شود. به‌وسیله Xهای به‌دست آمده FI و EEI مجدداً محاسبه می‌شود. FI به‌دست آمده ظن مناسبی از FI بهینه به ما می‌دهد. اما با کاهش FI و تکرار محاسبات تا آنجا که از فضای احتمال خارج نشویم، FI مینیمم محاسبه خواهد شد. در نهایت با اجرای مرحله دوم مدل، اندازه هریک از منابع مصرفی بر مبنای FI کمینه و EEI بهینه محاسبه خواهد شد.

1. FI= Financial Rate شاخص مالی

2. EEI= Environment Energy Index شاخص پایداری

بر مبنای محاسبات فصول قبل جدول ۱-۵ محاسبات مربوط به شاخص‌های پایداری، مالی و زیست‌محیطی را نشان می‌دهد.

جدول ۱-۵. شاخص پایداری، مالی و زیست‌محیطی برای کل جهان

منبع انرژی	شاخص مالی	شاخص پایداری	شاخص زیست‌محیطی
هسته‌ای	۲۲/۵۰۰۶۴۲۵۲	۴/۲۶۲×۱۰ ^{-۵}	۱/۵۴
زغال‌سنگ	۲۴/۱۴۳۵۹۶۹۹	۰/۰۳۷۹۵۵۴۵۱	۱۰۳/۸۳
گاز طبیعی	۲۴/۰۳۶۶۳۱۵۱	۰/۰۱۰۹۱۶۸۷۱	۵۱/۹۸
نفت	۳۱/۵۸۳۸۹۹۱۴	۰/۰۰۹۴۸۵۷۷۴	۷۷/۰۹
بادی، دریایی	۵۰/۵۸۸۵۰۱۴۸	۰/۰۳۶۷۷۰۷۲۵	۲/۶۵
بادی، خشکی	۳۵/۶۵۰۱۴۸۸۹	۰/۶۳۳۴۵۹۳۱۲	۲/۶۵
خورشیدی PV	۱۴۴/۵۶۵۴۳۸۶	۲/۸۲۹۶۷۴۴۴۷	۷/۰۲
خورشیدی Thermal	۶۸/۱۱۵۵۷۹۸۴	۱/۶۵۸۰۲۵۴۲۹	۷/۰۲
زمین‌گرمایی	۳۴/۰۷۸۱۳۲۹۶	۰/۰۷۵۲۱۲۸۴۷	۵/۳۹
آبی	۴۲/۷۳۱۰۰۱۵۷	۰/۰۸۳۵۶۹۸۳	۷/۱
بیومس	۳۵/۵۳۲۲۱۸۲۱	۰/۰۷۸۱۳۷۷۹۱	۴/۷

قبل از اجرا و محاسبه مدل در اندازه جهانی باید FI شاخص مالی و EEI شاخص زیست‌محیطی موجود جهان محاسبه شود. برای انجام این محاسبه الگوی وضعیت موجود مصرف جهان باید در نظر گرفته شود. جدول ۲-۵ الگوی موجود مصرف انرژی جهان را نشان می‌دهد.

جدول ۲-۵. الگوی موجود مصرف انرژی جهان

منبع	درصد انرژی مورد استفاده در حال حاضر جهان
هسته‌ای	۰/۰۲
زغال‌سنگ	۰/۲۸۴
گاز طبیعی	۰/۲۲۱
نفت	۰/۳۴۶
بادی، دریایی	۰/۰۰۱۹۳۸
بادی، خشکی	۰/۰۰۰۰۶۲
خورشیدی PV	۰/۰۰۰۹۷۷
خورشیدی Thermal	۰/۰۰۰۰۲۳
زمین‌گرمایی	۰/۰۰۱
آبی	۰/۰۲۳
بیومس	۰/۱۰۲



به منظور محاسبه FI و EEI حال حاضر جهان محاسبات زیر باید انجام شود:

$$FI_{current} = \sum FI_{icurrent} \times X_{icurrent}$$

$$EEI_{current} = \sum EE_{icurrent} \times X_{icurrent}$$

شاخص زیست محیطی حال حاضر جهان = $EEI_{current}$

شاخص مالی حال حاضر جهان = $FI_{current}$

$X_{icurrent}$ = (درصد منبع انرژی مورد استفاده برای منبع x از کل منابع انرژی مصرفی جهان)

$FI_{icurrent} = (Xi)$ (ضریب مالی برای)

$EEI_{icurrent} = (Xi)$ (شاخص مالی برای)

جدول زیر نتایج حاصل برای شاخص‌های مالی و زیست‌محیطی را نشان می‌دهد.

جدول ۳-۵. شاخص کل زیست‌محیطی و مالی جهان

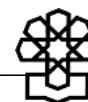
منبع	شاخص زیست‌محیطی موجود	شاخص مالی موجود
هسته‌ای	۰/۰۳۰۸	۰/۴۵
زغال‌سنگ	۲۹/۴۸	۶/۸۵
گاز طبیعی	۱۱/۴۸	۵/۳۱۲
نفت	۲۶/۶۷	۱۰/۹۲
بادی، دریایی	۰/۰۰۵۱	۰/۰۹۸
بادی، خشکی	۰/۰۰۰۱۶	۰/۰۰۲۲
خورشیدی PV	۰/۰۰۶۸	۰/۱۴۱
خورشیدی Thermal	۰/۰۰۰۱۶	۰/۰۰۱۵
زمین‌گرمایی	۰/۰۰۵۳۹	۰/۰۳۴
آبی	۰/۱۶۳۳	۰/۹۸
بایومس	۰/۴۷۹۴	۳/۶۲
مجموع	۶۸/۳۳	۲۸/۴۳

بر مبنای جدول بالا FI (شاخص مالی) و EEI (شاخص زیست‌محیطی) برای الگوی جاری مصرف جهانی ۲۸/۴۳ و ۶۸/۳۳ می‌باشد. برای در نظر گرفتن محاسبات جامع همان‌طور که اشاره شد باید سناریوهای مختلف بر مبنای تعریف پایداری در نظر گرفته شود. به همین منظور ۶ سناریو با فواصل صدسال در نظر می‌گیریم. برای اجرای مدل با در نظر گرفتن سال پایداری، بیشینه شاخص زیست‌محیطی برابر وضع موجود در نظر گرفته می‌شود. این محاسبه برای ۶ سناریو مختلف تکرار می‌شود. نتایج محاسبات در جدول زیر مشخص است. مدل به وسیله نرم‌افزار Solver حل شده است.

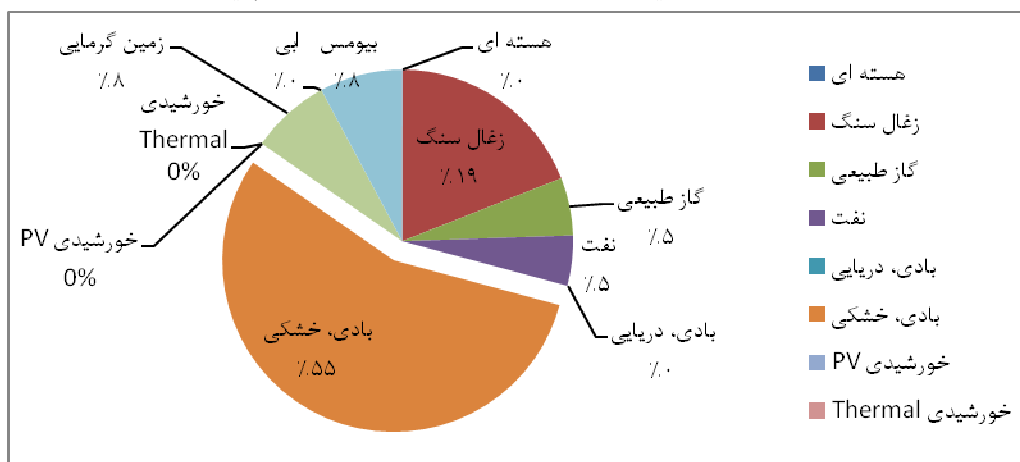
جدول ۴-۵. حل مدل برای سناریوهای مختلف

EEI=68.33968 تعریف پایداری برای سناریوهای مختلف تغییر می‌کند							منبع انرژی	ورودی‌های مرحله اول اجرای مدل
پایداری ۵۰۰ ساله	پایداری ۴۰۰ ساله	پایداری ۳۰۰ ساله	پایداری ۲۰۰ ساله	پایداری ۱۰۰ ساله	الگوی بهینه موجود	الگوی موجود		
$4/262 \times 10^{-5}$	$4/262 \times 10^{-5}$	$7/103 \times 10^{-5}$	$4/262 \times 10^{-5}$	$0/0001066$	$0/0002131$	$0/02$	هسته‌ای	مرحله اول اجرای مدل
$0/0379555$	$0/0379555$	$0/0632591$	$0/0379555$	$0/0948886$	$0/1897773$	$0/284$	زغال سنگ	
$0/0109169$	$0/0109169$	$0/0181948$	$0/0109169$	$0/0272922$	$0/0545844$	$0/221$	گاز طبیعی	
$0/0094858$	$0/0094858$	$0/0158096$	$0/0094858$	$0/0237144$	$0/0427158$	$0/346$	نفت	
$0/0237402$	$0/0367707$	$0/0121668$	$0/0367707$	$0/0292006$	$0/0367707$	$0/001938$	بادی، دریایی	
$0/6334593$	$0/6334593$	$0/6334593$	$0/6334593$	$0/5838463$	$0/4197107$	$0/000062$	بادی، خشکی	
$0/0237402$	$0/012757$	$0/0121668$	$0/012757$	$0/0292006$	$0/0715523$	$0/000977$	خورشیدی PV	
$0/0237402$	$0/0216918$	$0/0121668$	$0/0216918$	$0/0292006$	$0/0520399$	$0/000023$	خورشیدی Thermal	
$0/0752128$	$0/0752128$	$0/0752128$	$0/0752128$	$0/0752128$	$0/0433524$	$0/001$	زمین گرمایی	
$0/0835698$	$0/0835698$	$0/0793561$	$0/0835698$	$0/0292006$	$0/0455609$	$0/023$	آبی	
$0/0781378$	$0/0781378$	$0/0781378$	$0/0781378$	$0/0781378$	$0/0437236$	$0/102$	بایومس	
$39/22869$	$38/154753$	$36/982129$	$38/154753$	$38/787474$	$42/93732$	-	FI اولیه	
$8/6805768$	$8/6236281$	$11/950633$	$8/6236281$	$16/113762$	$28/675103$	-	EEI بهینه اولیه	
$4/262 \times 10^{-5}$	$5/232 \times 10^{-5}$	$7/103 \times 10^{-5}$	$0/000107$	$0/000213$	$0/02$	$0/02$	هسته‌ای	مرحله نهایی اجرای مدل
$0/0379555$	$0/047444$	$0/063259$	$0/094889$	$0/189777$	$0/284$	$0/284$	زغال سنگ	
$0/010917$	$0/013646$	$0/018195$	$0/027292$	$0/054584$	$0/221$	$0/221$	گاز طبیعی	
$0/009486$	$0/011857$	$0/015809$	$0/023714$	$0/047429$	$0/2601946$	$0/346$	نفت	
$0/036771$	$0/036771$	$0/03229$	۰	۰	۰	$0/001938$	بادی، دریایی	
$0/633458$	$0/633458$	$0/633458$	$0/633459$	$0/554646$	$0/0614548$	$0/000062$	بادی، خشکی	
$0/0073$	$-1/00 \times 10^{-5}$	۰	۰	۰	۰	$0/000977$	خورشیدی PV	
$0/027153$	$0/019853$	۰	۰	۰	۰	$0/000023$	خورشیدی Thermal	
$0/075212$	$0/075212$	$0/075212$	$0/075213$	$0/075213$	$0/0752128$	$0/001$	زمین گرمایی	
$0/08357$	$0/08357$	$0/08357$	$0/067188$	۰	۰	$0/023$	آبی	
$0/078137$	$0/078137$	$0/078137$	$0/078138$	$0/078138$	$0/0781378$	$0/102$	بایومس	
$37/73768$	$36/55489$	$35/59243$	$34/49182$	$32/50944$	$28/367244$	-	FI کمینه	
$8/623642$	$9/831073$	$11/86298$	$16/02759$	$28/44094$	$62/00001$	-	EEI بهینه نهایی	

همان‌طور که جدول بالا نشان می‌دهد با افزایش سال‌های پایداری در محاسبات از میزان مصرف انرژی‌های فسیلی کاسته و به حجم تولید از انرژی‌های نو افزوده می‌شود. به‌عنوان مثال الگوی بهینه انرژی را برای ۱۰۰ سال پایداری از جدول بالا استخراج می‌کنیم. این الگو به‌صورت مصور در نمودار ۱-۵ رسم شده است.

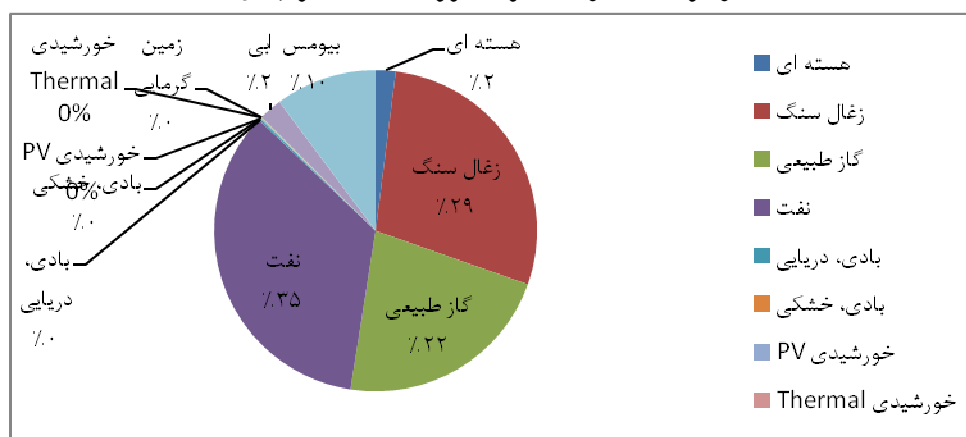


نمودار ۱-۵. الگوی بهینه مصرف انرژی جهان برای ۱۰۰ سال پایداری انرژی



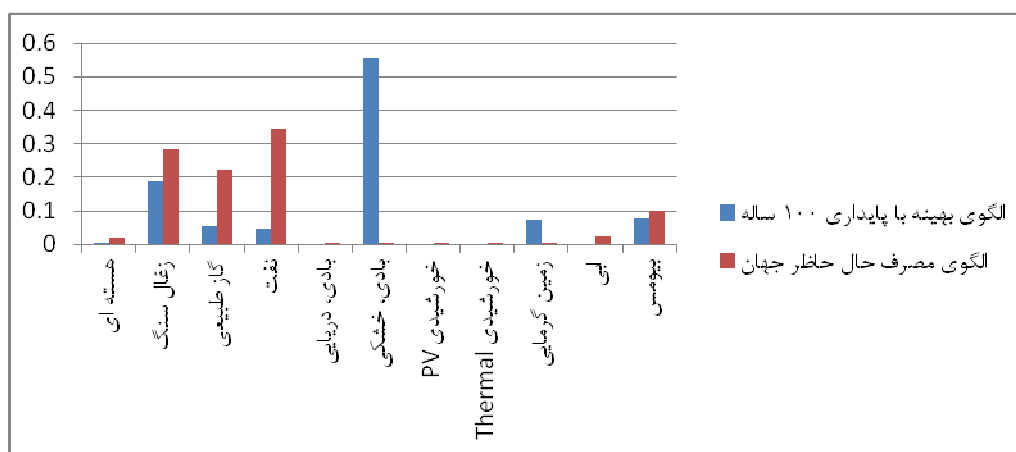
بر مبنای محاسبات انجام شده با تغییر الگوی مصرف انرژی و افزایش سرمایه‌گذاری در بخش انرژی‌های نو می‌توان همان‌طور که شکل بالا نشان می‌دهد به ۱۰۰ سال پایداری انرژی دست یافت و از شاخص زیست‌محیطی به شدت کاست. عدد به دست آمده برای شاخص مالی کل در این الگوی مصرف ۳۲/۴۹ است. این عدد ۱۲/۵۴ درصد بیشتر از هزینه انرژی امروز جهان است. اما با تغییر الگوی مصرف می‌توان شاخص زیست‌محیطی را از ۶۸/۳۳ امروز به ۲۸/۴۴ کاهش داد. این یعنی ۵۸/۳۷ درصد کاهش خسارت به محیط زیست. برای درک بهتر از الگوی بهینه ارائه شده به مقایسه آن با وضعیت موجود جهان می‌پردازیم. نمودار ۲-۵ الگوی حال حاضر مصرف جهان را نشان می‌دهد.

نمودار ۲-۵. الگوی مصرف انرژی حال حاضر جهان



طبق الگوی مصرف فعلی عموماً نفت و زغال‌سنگ به‌عنوان منبع اصلی انرژی استفاده می‌شوند، اما در الگوی ۱۰۰ سال پایداری با کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی بیشترین سهم تولید انرژی مربوط به انرژی بادی است. نمودار ۳-۵ به مقایسه نسبت هریک از منابع انرژی در الگوهای حال حاضر جهان و ۱۰۰ سال پایداری می‌پردازد.

نمودار ۳-۵. مقایسه نسبت هریک از منابع انرژی در الگوهای تولید انرژی سال ۲۰۱۲ و ۱۰۰ سال پایداری



همان‌طور که از نمودار بالا پیداست در الگوی بهینه نسبت به سال ۲۰۱۲ از درصد منابع فسیلی کاسته شده و به منابع بادی و خشکی و زمین‌گرمایی اضافه شده است. برای دستیابی به این الگو باید ظرفیت هریک از منابع بادی خشکی و زمین‌گرمایی به ترتیب به ۵۵/۴۶ و ۷/۵۲ درصد افزایش یابد. این در حالی است که سهم هریک از منابع زغال‌سنگ، گاز طبیعی، نفت و بایومس به ترتیب به ۹/۴۲، ۱۶/۶۵، ۲۹/۸۶ و ۲/۳۹ درصد کاهش می‌یابد.

ویژگی‌های مدل بهینه با پایداری صدساله

۱. امکان دسترسی به منابع سوختی فسیلی برای مدت یکصد سال،
۲. کمترین هزینه ممکن برای تولید انرژی،
۳. کمترین خسارت ممکن به محیط زیست.

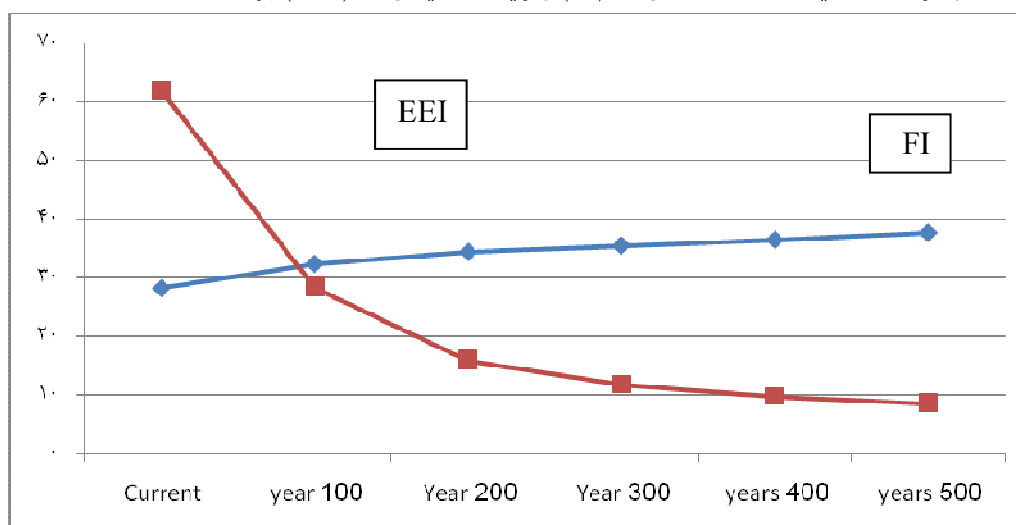
بررسی نتایج محاسبات

نگاهی به نتایج به‌دست آمده از محاسبات نشان می‌دهد که الگوی مصرف انرژی موجود جهان بیشتر اقتصادی است تا منطبق بر ملاحظات زیست‌محیطی. بر مبنای الگوی ارائه شده کمی سرمایه‌گذاری بیشتر در بخش انرژی جهانی و استفاده مناسب از الگوی مصرف می‌توان به منابع انرژی پایدارتر با تخریب زیست‌محیطی کمتر رسید. باید دقت کرد که می‌توان با تغییر الگوی



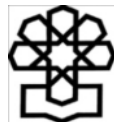
موجود مصرف جهان با سرمایه‌گذاری تقریباً مشابه حدود ۶۰ شماره از شاخص زیست‌محیطی کاهش داد. البته واضح است که الگوی مصرف کنونی جهان الگوی پایداری نیست. منابع فسیلی امکان ادامه تولید در این سطح را ندارند. به همین منظور باید به تحلیل سناریوهای مختلف پایداری پرداخت. شکل زیر به مقایسه سناریوهای مختلف پایداری برای ۱۰۰ سال تا ۵۰۰ سال می‌پردازد. با افزایش پایداری نسبت مصرف منابع فسیلی کاهش یافته و سهم منابع تجدیدپذیر افزایش می‌یابد. از شکل زیر مشخص است که با سناریو ۱۰۰ سال پایداری شاخص پایداری اندکی افزایش یافته اما شاخص زیست‌محیطی کاهش فوق‌العاده‌ای نشان می‌دهد. برای صد سال پایداری با کمی افزایش سرمایه‌گذاری در بخش انرژی یعنی از ۲۸/۴۳ واحد به ۳۲/۵ می‌توان به کاهش ۴۰ واحدی در شاخص زیست‌محیطی دست یافت. نتیجه جالب از این محاسبات اینکه تنها با افزایش ۱۳ واحد به شاخص مالی می‌توان شاخص زیست‌محیطی را به زیر ۱۰ واحد رساند و به ۵۰۰ سال انرژی پایدار دست یافت. نمودار EEI بیانگر شاخص زیست‌محیطی کل و نمودار FI بیانگر شاخص مالی کل طبق الگوی ارائه شده با سال‌های متفاوت پایداری است.

نمودار ۴-۵. مقایسه شاخص مالی کل (FI) و زیست‌محیطی کل (EEI) برای سال‌های مختلف



منابع و مأخذ

1. "Energy Studies", Second Edition, W.Shepherd, Imperil College Press, London, 2005.
2. "Energy in Transition 1985-2010", Final Report of the Committee on Nuclear and Alternative Energy System, Chapter 4, National Research Council, Washangton, DC, USA, 1980.
3. Mc Veigh, J. C. [1984] Energy Around the World (Pergamon Press, Oxford, England), Chapter 4.
4. "BP statistical Review of World Energy", BP Amoco plc, London, UK, Jun 2001.
5. "Geothermal Energy Facts (Advanced Level)", Geothermal Education Office, Washington, DC, USA, Jun.2001.
6. "World Energy Resources: 1985-2020" , Word Energy Conference, London, Eglad,1980.
7. "world Energy Outlook 2011", Energy Information Administration, 2011.
8. "World Oil Outlook 2011", Organization of the Petroleum Exporting Countries, Vienna, Austria, 2011.
9. Population Division of the Department of Economic and Social Affairs of the United Nations Secretariat, <http://esa.un.org/unpp>.
10. "Energy and Climate Change, Creating a Sustainable Future, David A.Coley, Center for Energy and the Environment, University of Exeter. Johan Wiley & Sons LTD, UK, 2008.
11. Renewable 2011 Global Status Report, Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, Paris, 2010.
12. "Greenhouse Gas Emission Of Electricity Generation Chains Assessing The Differences",Joseph V. Spadaro, IAEA Bulletins, 2000.
13. "Renewable energy sources: Their global potential for the first-half of the 21st century at a global level: An integrated approach", Bert J.M. de Vriesa, Energy Policy, September 2006.
14. "Global Potential Of Renewable Energy Resources: a Literature Assessment", Monique Hoogwijk, Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, 2008.
15. "BP statistical Review of World Energy", BP Amoco plc, London, UK, Jun 2001.
16. "Projected Cost of Electricity Generating", International Energy Agency, France, 2010.



مرکز پژوهش‌ها
مجلس شورای اسلامی

شماره مسلسل: ۱۳۷۸۱

شناسنامه گزارش

عنوان گزارش: ارائه مدل مدیریت منابع انرژی (با استفاده از روش برنامه‌ریزی خطی)

نام دفتر: مطالعات انرژی، صنعت و معدن (گروه انرژی)

تهیه و تدوین: محمدحسین یارمحمد

ناظران علمی: پروفسور بونکارتز، محمدرضا محمدخانی، هوشنگ محمدی،

علی‌اصغر اسماعیل‌نیا

متقاضی: معاونت پژوهش‌های زیربنایی و امور تولیدی

ویراستار تخصصی: —

ویراستار ادبی: —

واژه‌های کلیدی: —



تاریخ انتشار: ۱۳۹۳/۷/۲۹