اولین کنفرانس انرژی های تجدیدپذیر و تولید پراکنده ایران
The First Iranian Conference on Renewable Energies and Distributed Generation
ICREDG 2010

فن‌آوری تبدیل انرژی حرارتی اقیانوس (OTEC) و بررسی امکان بکارگیری آن جهت تولید محصولات جانبی

مجید رضا ناصح ، محمد کاظم عدالتیان

چکیده - با توجه به بحران انرژی و رو به اتمام بودن منابع تجدید ناپذیر مانند: نفت، ذغال‌سنگ و غیره، در سال‌های اخیر توجه خاصی به استفاده از منابع تجدید پذیر گردیده است. اقیانوس‌ها منبع وسیع انرژی می‌باشند و به کارگیری انرژی حرارتی اقیانوس‌ها به عنوان یکی از تکنولوژی‌های انرژی تجدیدپذیر در حال گسترش می‌باشد. در این مقاله ضمن بررسی تاریخچه، فن‌آوری تبدیل انرژی حرارتی اقیانوس و آخرین تحولات انجام گرفته در این‌خصوص مورد بررسی قرار گرفته است. علاوه بر آن، با احداث این نیروگاه‌ها، در کنار تولید انرژی الکتریکی می‌توان برخی محصولات جانبی را نیز بدست آورد که در این مقاله بررسی گردیده است.

***واژه‌های کلیدی*- تبدیل انرژی حرارتی اقیانوس، OTEC، منابع انرژی تجدیدپذیر، انرژی خورشید.**

1- مقدمه

اقیانوس‌ها اندکی بیش از 70 درصد سطح زمین را فرا گرفته‌اند. این امر بزرگترین سیستم ذخیره و جمع آوری انرژی حرارتی خورشید را در جهان تشکیل می‌دهد[1]. اقیانوس منابع کافی از انرژی را به میزان گسترده و عظیم دارد و می‌تواند نیاز جهان به انرژی را برای مدت زیادی تامین کند. نفت خام حاصل از فرایندهای طبیعی از میلیون‌ها سال قبل می‌باشد و هم‌اکنون جهت مصارف گوناگون مورد استفاده بشرمی‌باشد. این منبع انرژی محدود بوده و تا چند سال دیگر تمام خواهند شد. در سال‌های گذشته توسعه انرژی هسته‌ای به عنوان پاسخی برای تمام نگرانی‌های انرژی بشر معرفی گردید، اما این‌گونه نشد، چرا که فجایع زیادی از قبیل فاجعه رودخانه اورال، واقعه چرنوبیل و... عمیقاً خطرات این انرژی را به همه نشان داد. ایده OTEC در سال 1870 میلادی توجه ژول ورن را به خود جلب کرد و بعد از آن توسط فیزیکدان فرانسوی ژاک آرسنوال[1] در سال 1881 طرح آن پیشنهاد گردید[1]. در سال 1920 یک نمونه آزمایشی از این نوع نیروگاه توسط جورج کلاد[2] یکی از دانشجویان آرسنوال ساخته شد. او در سال 1930 یک نیروگاه OTEC از نوع سیکل باز با قدرت 60 کیلووات را در منطقه خلیج مانتانزاس[3] کوبا احداث نمود[8].

با جایگزینی انرژی تجدیدپذیر گرفته شده از دریا به جای طرح‌های سوخت فسیلی، می‌توان محیط زیست را بهبود بخشید و توزیع کربن را کاهش داد[2]. با توجه به اینکه پیش بینی می شود که در سال‌های آینده قیمت سوخت افزایش یافته و کمیاب گردد، بررسی تغییرات خورشید و امکان بکارگیری انرژی آن به صورت‌های مختلف بطور جدی مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این میان یکی از گزینه‌های مناسب به تبدیل انرژی حرارتی اقیانوس‌ها[4] می‌باشد[3].

از نظر تاریخی ایده تبدیل انرژی حرارتی اقیانوس‌ها به عنوان راهی برای استخراج مقداری از انرژی خورشیدی ذخیره شده دربخش‌های گرمسیری اقیانوس‌ها (1930 کلایود، 1881 آرسونوال) می‌باشد. مکانیزم عملکرد OTEC مبتنی بر ایجاد یک چرخه عظیم بین آب‌های گرم سطحی و آب‌های سرد در عمق دری می‌باشد[4].

انواع نیروگاه‌های متداول که از انرژی خورشید استفاده می‌کنند، تابش خورشیدی را جمع آوری نموده و حرارت حاصل را با چرخه انرژی مانند چرخه رانکین و یک ژنراتور به الکتریسیته تبدیل می کند.

در این وضعیت، تبدیل انرژی براساس انبساط حرارتی می‌باشد. سیال مورد استفاده، با تابش خورشید گرم می‌شود و بسته به اختلاف دمای موجود منبسط می‌شود. این انبساط باعث افزایش

مجید رضا ناصح: دانشگاه آزاد اسلامی واحد بیرجند،
naseh@iau-birjand.ac.ir
محمد کاظم عدالتیان: دانشگاه آزاد اسلامی واحد بیرجند،

[1] Jacques d'Arsonval

[2] Georges Claude
[3] Mantanzas
[4] OTEC: ocean temperature energy conversion

فشار سیال در زمان رسیدن به نقطه جوش می‌شود. چنانچه فشار بخار به اندازه کافی زیاد باشد می‌تواند توربین را به حرکت درآورد. پس از به حرکت درآمدن توربین، سیال بکار رفته مقداری از انرژی خود را از دست می‌دهد اما برای اینکه به حالت اولیه خود برگردد لازم است که سرد شود. به‌کارگیری حرارت خورشیدی از تکنولوژی‌هایی می‌باشد که در مقایسه با تکنولوژی شکافت هسته‌ای ایمن‌تر می‌باشد. در شرایط کنونی افزایش ایمنی یکی از شاخص‌های مهم برای محافظت از محیط زیست می باشد.

این مقاله علاوه بر بخش کنونی به عنوان مقدمه از بخش‌های زیر تشکیل گردیده است: در بخش دوم فن‌آوری تبدیل انرژی حرارتی اقیانوس و اصول عملکرد آن ارائه گردیده است. از مزایای OTEC تولید محصولاتی است که با توجه به شرایط مکانی آن می‌توانند کاربرد داشته باشند که در بخش سوم به معرفی این محصولات پرداخته شده است. در بخش چهارم جمع بندی و نتیجه گیری ارائه شده است. در بخش پنجم نیز مراجع مورد استفاده در این مقاله ارائه گردیده است.

2- فن‌آوری تبدیل انرژی حرارتی اقیانوس

تعریفOTEC: تبدیل انرژی حرارتی اقیانوس، یکی از فن‌آوری‌هایی است که به طور غیر مستقیم تابش خورشیدی را به نیروی برق تبدیل می‌کند. سیستم‌های OTEC از اختلاف دمای طبیعی سطح و عمق اقیانوس استفاده می‌کنند. در نتیجه با استفاده از اختلاف دمای بین آب گرم سطحی و آب سرد عمق بیش از 600 متر با دمای تقریبی 20 درجه سانتی گراد یک سیستم OTEC می‌تواند مقدار برق قابل توجهی تولید کند[1].

اصول عملکرد OTEC: در این سیستم‌ها ابتدا آب گرم از سطح اقیانوس مناطق گرمسیری جمع آوری گردیده سپس توسط پمپ‌های آب گرم پمپاژ می شود. این آب از درون دیگ بخار عبور داده می شود و مقداری از آب گرم برای گرم کردن سیال مورد استفاده که معمولاً پروپان یا مواد نظیر آنست، استفاده می‌شود. اگر این آب سردتر باشد، می‌توان از ماده دیگری که نقطه جوش پایین‌تری دارد، مانند محلول آمونیاک، استفاده گردد. آب سرد از عمق دریا به داخل متراکم ساز پمپاژ می‌شود، جایی که بخار دوباره به حالت مایع برگردانده می‌شود. بخش اندکی از انرژی الکتریکی تولیدی مجموعه توربین-ژنراتور برای پمپاژ سیال در درون سیستم و راه اندازی تجهیزات داخلی استفاده می شود اما بیشتر آن به صورت برق خالص به شبکه تحویل می‌گردد[1]. سه نوع طرح برای OTEC وجود دارد: سیکل بسته[1]، سیکل باز[2] و سیکل ترکیبی[3] [2].

[1] - CC-OTEC : Close Cycle OTEC

2-1- سیکل بسته

در سیستم‌های CC-OTEC از سطح آب گرم دریا و آب سرد دریا برای بخار و متراکم ساختن یک سیال مانند محلول آمونیاک استفاده می‌شود که یک توربین ژنراتور را در یک چرخه بسته تولید کننده برق به حرکت در می آورد. شکل1 بلوک دیاگرام ساده‌ای از روند سیکل بسته (CC-OTEC) را نشان می دهد. در این سیکل داریم:

$$q_A = h_1 - h_4 \quad (1)$$

$$w_T = h_1 - h_2 \quad (2)$$

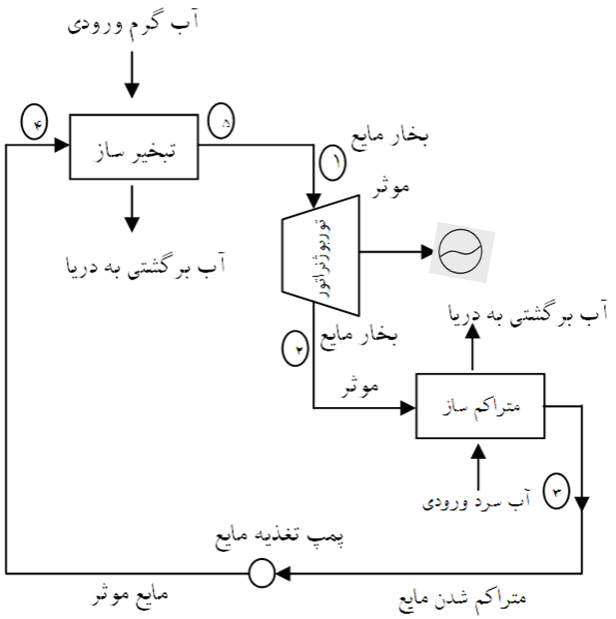
$$|q_R| = h_2 - h_3 \quad (3)$$

$$|w_p| = h_4 - h_3 \quad (4)$$

$$h_{th} = \frac{\Delta w_{net}}{q_A} = \frac{(h_1 - h_2) - (h_4 - h_3)}{(h_1 - h_4)} \quad (5)$$

که در این روابط داریم:

h	آنتالپی مخصوص در نقاط مختلف
q_A	حرارت اضافه شده بر حسب J/Kg
w_T	کار توربین بر حسب J/Kg
$\|q_R\|$	گرمای بازگشتی بر حسب J/Kg
$\|w_P\|$	کار پمپ بر حسب J/Kg
h_{th}	کار خالص سیکل



شکل1- بلوک دیاگرام OTEC سیکل بسته

[2] - OC-OTEC : Open Cycle OTEC
[3] - Hybrid- Cycle OTEC

2-2- سیکل باز

در سیستم‌های OC-OTEC، آب گرم دریا به درون یک تبخیرساز پمپاژ می شود که فشار داخلی آن کمتر از 0/03 بار است و باعث می‌شود آب در دمای 22 درجه سانتی‌گراد بجوشد[1]. بخار کم فشار حاصل برای به چرخش درآوردن توربین مولد استفاده می‌شود. از آب سرد دریا برای متراکم ساختن بخار پس از عبور از توربین استفاده می‌شود. بنابراین سیکل‌باز می‌تواند هم برای تولید آب تصفیه شده و هم برق، طراحی شود.

در شکل2 بلوک دیاگرام عملکرد OTEC سیکل باز را نشان می‌دهد. در این شکل داریم:

$$q_w = \dot{m}_{ww} C_p (T_{wwi} - T_{wwo}) \quad (6)$$

$$\dot{m}_s = q_w / hfg \quad (7)$$

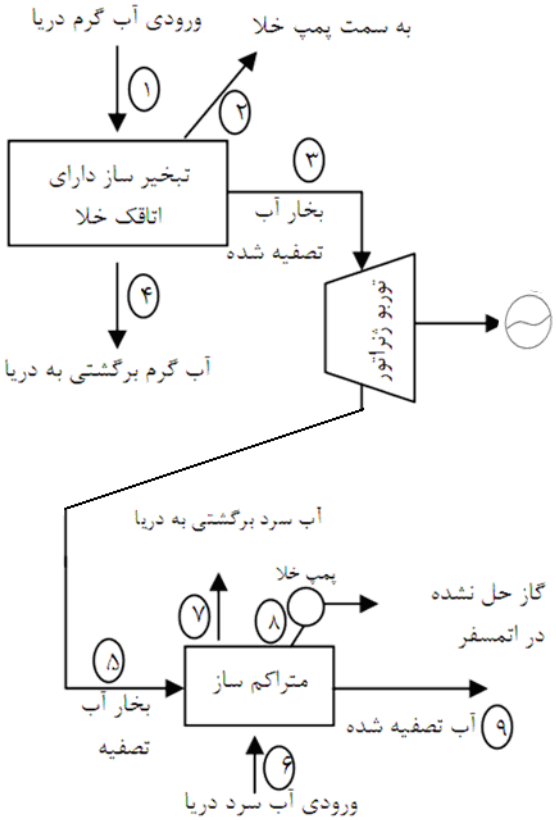
$$w_T = \dot{m}_s (h_3 - h_5) = \dot{m}_s h_T (h_3 - h_{5s}) \quad (8)$$

$$q_c = \dot{m}_{cw} C_p (T_{cwo} - T_{cwi}) \quad (9)$$

در روابط فوق داریم:

q_w	گرمای جذب شده از آب دریا بر حسب J/s
$\dot{m}_s$	تغییرات بخار بر حسب Kg/s
w_T	کار توربین بر حسب J/s
q_c	گرمای برگشتی به آب دریا بر حسب J/s
$\dot{m}_{ww}$	سرعت جریان توده آب گرم
C_p	گرمای ویژه
T_{wwi}	دمای آب دریای ورودی مبدل گرمایی
T_{wwo}	دمای آب دریای خروجی مبدل گرمایی
hfg	گرمای تبخیر
h	آنتالپی مخصوص در نقاط مختلف
h_T	بازده توربین

منظور از زیرنویس s آنتروپی پایدار و همچنین زیرنویس cw اشاره به آب سرد می‌باشد.



شکل 2- بلوک دیاگرام OTEC سیکل باز

2-3- سیکل ترکیبی

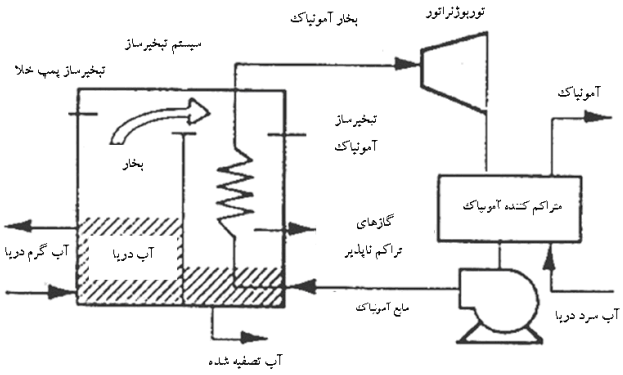
یک سیکل ترکیبی، ترکیبی از سیکل بسته و باز است که در آن آب دریا به سرعت بخار شده به عنوان سیال موثر سیکل بسته استفاده می شود.

3- محصولات جانبی OTEC

نیروگاه‌های OTEC در کنار تولید انرژی الکتریکی، توانایی تولید محصولات دیگری را نیز دارند که در ادامه به این محصولات پرداخته می‌شود.

3-1- آب شیرین و غذای دریایی

هر چه مردم جهان زندگی پررونق‌تری پیدا کنند تقاضای بیشتری برای غذاهای کیفیت بالا وجود خواهد داشت. علاوه بر آن صنعت، کشاورزی و اقتصاد به آب شیرین بیشتری نیاز خواهند داشت. اگر تقاضای زیادی برای آب شیرین باشد می‌توان از این روش به جای تولید برق برای تولید آب شیرین استفاده کرد.



شکل3- تولید آب تصفیه شده

این سیستم در جزایری که کمبود آب شیرین دارند می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. فن‌آوری OTEC از آب عمق دریا استفاده می‌کند که سرشار از مواد غذایی است و یکی از نتایج این امر این است که مقدار زیادی ماهی و دیگر غذاهای دریایی در جریان خروجی جمع خواهند شد. این بدان معناست که OTEC نه تنها برق تولید می کند بلکه آب و غذا هم تولید خواهد کرد. آب شیرین زمانی تولید می شود که آب سرد را در معرض بخار جریان آب گرم در یک مخزن بزرگ قرار دهیم[1]. در شکل3 مکانیزم تولید آب تصفیه شده توسط این سیستم نمایش داده شده است. بخار در مبدل گرمایی متراکم می شود و نمک آن در جریان آب گرم باقی می ماند. آب تولید شده کاملاً بی‌نمک است و برای تمام مصارف کشاورزی، اقتصادی و صنعتی و کاربردهای خانگی مناسب است[5].

NELHA[1] یکی از مراکز بزرگ پروژه‌های OTEC جهت تولید مواد غذایی غنی دریایی، محصولات کشاورزی آب سرد، غذاهای دریایی، مروارید و تعداد دیگری از محصولات است[6].

- **محصولات نیازمند آب سرد**: برخی محصولات (به عنوان مثال گیاه توت فرنگی) با شرایط خشک و داغ بیابان سازگاری ندارند، با این حال می‌توان آب سرد عمق اقیانوس را از طریق عبور از لوله‌هایی که متراکم‌ساز هستند، جهت آبیاری استفاده نمود. یکی دیگر از محصولات خرچنگ‌های دریایی می‌باشد.

3-2- نهرهای ریز جلبک

محصولات پرارزش از قبیل زیست داروها و زیست رنگدانه‌ها بیشترین شانس را برای موفقیت اقتصادی دارند، به ویژه آستاکسانتین یکی از رنگ دانه‌های قرمز طبیعی متعلق به گروه کاروتوئیدها، آینده خوبی دارد[6].

3-3- تولید هیدروژن :

بسیاری از ابزارهای حمل و نقل و تحویل انرژی از نیروگاه‌ها که در مناطق گرمسیری اقیانوس گسترش یافته است بررسی شده‌اند. انرژی OTEC را می‌توان از طریق حامل‌های الکتریکی، شیمیایی، گرمایی و الکتروشیمیایی انتقال داد. ارزیابی فنی حامل‌های غیر الکتریکی به بررسی هیدروژن تولید شده با استفاده از برق و آب شیرین تولیدی فن آوری OTEC منتهی می‌شود. یک نیروگاه شناور 100 مگاواتی را می‌توان طوری طراحی کرد (از طریق الکترولیز) تا در هر ساعت 1300 کیلوگرم هیدروژن مایع تولید کند. هزینه تولید هیدروژن تحویل داده شده به لنگرگاه معادل هزینه یک بشکه نفت خام 250 دلاری خواهد بود. در حال حاضر تنها حامل انرژی که برای برق OTEC صرفه اقتصادی دارد، کابل برق زیر آبی می‌باشد [7].

3-4- مزایا و معایب OTEC

در مجموع مزایا و معایب نیروگاه‌های مبدل انرژی حرارتی اقیانوس به شرح ذیل می‌باشد:

مزایای OTEC:

1. OTEC از منابع پاک، تجدید پذیر و طبیعی استفاده می‌کند. آب گرم سطح دریا و آب سرد عمق اقیانوس‌ها برای تولید برق، جایگزین سوخت‌های فسیلی می شود.
2. اگر نیروگاه‌های OTEC به درستی طراحی شوند، نه دی اکسید کربن و نه هیچ ماده شیمیایی آلاینده‌ای تولید نخواهند کرد.
3. سیستم‌های OTEC می‌توانند هم آب شیرین و هم برق تولید کنند. این یک مزیت برجسته برای مناطق جزیره‌ای است که دسترسی کمی به آب شیرین دارند.
4. انرژی خورشیدی که توسط لایه سطحی اقیانوس در مناطق گرمسیری دریافت و ذخیره می شود می‌تواند بیشتر نیازهای انرژی انسان را در حال حاضر رفع کند.

معایب OTEC:

1. برق حاصل از OTEC در حال حاضر هزینه بیشتری از برق تولیدی سوخت‌های فسیلی با قیمت کنونی آنها دارد، بنابراین احداث این نیروگاه‌ها فقط به منظور بهره‌برداری از انرژی الکتریکی مقرون به صرفه نمی‌باشد.
2. نیروگاه‌های OTEC باید در جایی واقع شوند که اختلاف دمای 20 درجه را در تمام طول سال داشته باشند. عمق اقیانوس باید نسبتاً به نیروگاه‌های زمینی

[1] - Natural Energy Laboratory of Hawaii Authority

نزدیک باشد تا کاربرد اقتصادی پیدا کند. نیروگاه‌های شناور انعطاف پذیری بیشتری دارند.

3. ساخت نیروگاه OTEC و خواباندن لوله‌ها در آب‌های ساحلی می تواند به آسیب موضعی تپه‌های دریایی و اکوسیستم‌های دریایی نزدیک به ساحل منجر شود.

4- نتایج و جمع‌بندی:

سوخت‌های فسیلی در آینده‌ای نزدیک تمام خواهد شد و ما مجبور خواهیم بود منبع انرژی جایگزینی بیابیم. نیروگاه‌های OTEC از یک جمع کننده تجدید پذیر خورشیدی یعنی دریا به جای جمع کننده‌های مصنوعی استفاده می کند. این می‌تواند در آینده جایگزینی برای انرژی هسته‌ای و سوخت های فسیلی باشد. قابلیت‌های OTEC بسیار گسترده است، اما این قابلیت‌ها تنها خاص انرژی برق حاصل از دریا نیست. انرژی حاصل از OTEC به سخت افزارهای غول پیکر نیازمند است و اجزای اصلی آن هنوز برای تولید انبوه آماده نیست و در حال حاضر هزینه‌های مالی بسیار زیادی دارد. حداقل تا دهه آینده، پیشرفت OTEC به طرح‌ها و کاربردهای موقعیتی محدود خواهد بود که برخی از کاربردهای آن برای فراهم کردن برق تجدید پذیر، تهویه هوا، تولید خوراکی‌های خاص، و تولید آب شیرین محدود می‌باشد. استفاده از جریان اقیانوس از عمق چند صد متری به خودی خود باعث تولید برخی محصولات می‌گردد، این اقلام شامل زیست داروها، زیست رنگدانه‌ها، مروارید، غذاهای دریایی و سبزی جات مشهور فصلی و حتی آب نوشیدنی و کاربردهای آرایشی هم می شود. در نهایت شایان ذکر است تا زمانی که خورشید به آب‌های اقیانوس می‌تابد، امکان تبدیل نیرو و دستیابی به محصولات جانبی از طریق OTEC همیشه موجود است.

5- مراجع:

[1] Maria Bechtel, and Erik Netz, "OTEC - Ocean Thermal Energy Conversion", http://www.exergy.se/ftp/cng97ot.pdf.

[2] Robin Pelc, and Rod M.Fujita, “Renewable energy from the ocean”, Environmental Defense, 5655 college Avenue suite 304, Oakland, CA 94618, 2002.

[3] Howard T.odum, “Emergy evalution of an OTEC electrical power system”, Energy, Vol 25: 389–393, 2000.

[4] Gerard C.Nihous, “An estimate of Atlantic Ocean thermal energy conversion (OTEC) resources”, Ocean Engineering, Vol 34: 2210–2221, 2007.

[5] Paul J.T.Straatman, and Wilfried G.J.H.M.Van Sark, “A new hybrid ocean thermal energy conversion – offshore solar pond (PTEC-OSP) design: A cost optimization approach”, Solar Energy, Vol 82: 520–527, 2008.

[6] Patrick Takahashi, "Energy from the Sea: the Potential and Realities of Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC)", *IOC Technical Series 66*, IOC Bruun Memorial Lectures, UNESCO 2003.

[7] Vega L.A., “Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC)”, OTEC, December 1999.

[8] http://www.seasolarpower.com/