

مولکول‌هایی که آینده را تغییر خواهند داد

احمد شعبانی^۱*

چکیده

تغییرات آب و هوایی و گرمایش زمین ناشی از گازهای گلخانه‌ای، تأمین بیش از ۸۰ درصد منابع انرژی جهان از سوخت‌های فسیلی که با تولید حجم وسیعی از گازهای گلخانه‌ای همراه است، محدودیت و تجدید ناپذیری سوخت‌های فسیلی و نیاز روزافزون و نمایی به انرژی، از بزرگ‌ترین چالش‌های جامعه صنعتی امروز می‌باشد. آهنگ مصرف بالاتر مواد مغذی نیتروژن‌دار نسبت به شیب رشد جمعیت و اختصاص یک الی دو درصد از انرژی مصرفی و سه الی پنج درصد از گاز طبیعی تولیدی در جهان به فرایند هابر-بوش در تولید آمونیاک به‌عنوان تنها پیش‌ماده صنعتی مواد مغذی نیتروژن‌دار در کشاورزی و کاهش روزافزون منابع آب‌های شیرین از دیگر نگرانی‌ها و چالش‌ها می‌باشد. محوریت و مرکز ثقل همه این چالش‌ها عمدتاً استوار بر مولکول‌های شیمیایی آب، متان، دی‌اکسید کربن، آمونیاک، اکسیژن، نیتروژن و هیدروژن، اجزای مولکول‌های منشأ حیات و مهم‌ترین فرایند فتوسنتز در طبیعت می‌باشد. در این مقاله با معرفی جایگاه و نقش هر یک از این هفت مولکول مهم و تأثیرگذار بر چالش‌های فوق، رهیافت‌ها و راهبردهایی مبتنی بر پژوهش و فناوری به منظور کاهش و رهایی از چالش‌های فرارو با فرایندهای مرتبط با این مولکول‌ها در آینده ارائه شده است.

واژگان کلیدی: آب، متان، دی‌اکسید کربن، آمونیاک، اکسیژن، نیتروژن، هیدروژن، فرایند هابر-بوش، انرژی، سوخت‌های فسیلی، گازهای گلخانه‌ای، فتوسنتز، فوتوگرمایی

*عهده‌دار مکاتبات، استاد، تلفن ۲۹۹۰۲۸۰۰، آدرس الکترونیکی: a-shaabani@sbu.ac.ir

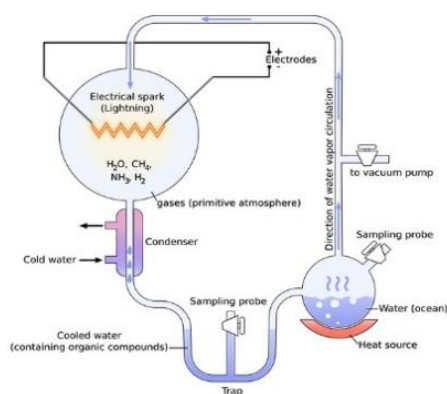
^۱ دانشکده شیمی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

نشریه نشاء علم، سال هشتم، شماره دوم، خرداد ماه ۹۷

مقدمه

تأمین‌کننده انرژی فعال‌سازی این فرایند فوتوکاتالیستی، ترکیبات آلی از قبیل سلولز و... و اکسیژن را به دست می‌دهد. مهم‌ترینکه پیش ماده‌های برخی از این عناصر یعنی آب، متان، دی‌اکسید کربن و اکسیژن در چرخه حیات به همدیگر تبدیل می‌شوند [۱].

از منظری نیز پیش ماده‌ی این عناصر، سازنده حیات تلقی می‌شوند. به‌طوری‌که باور بر این است میلیاردها سال پیش گازهای متان، آمونیاک، بخار آب و هیدروژن در اتم‌سفر وجود داشته و با پیدایش زمین منشأ حیات شده است. ایده و باوری که حیات با ترکیب کربن و دیگر عناصر به وجود می‌آید، اولین بار در دهه‌ی ۱۹۵۰ توسط دانشمندی به نام استنلی میلر^۱ آزمایش شد. او برای اثبات ایده خود ظرف شیشه‌ای محتوی هوا را با گازهایی پر کرد که فکر می‌کرد در زمین اولیه وجود داشتند. در همان ظرف الکترودهایی قرار داد تا با جرقه زدن، نوعی رعد و برق مینیاتوری بسازد. بعد از چند روز که سامانه‌ی زمین مصنوعی میلر کار کرد، متوجه به وجود آمدن ماده‌ای عجیب درون ظروف شیشه‌ای شد. این ماده را آزمایش کرد و فهمید که چیزی نیست جز آمینواسید. آمینواسیدها ترکیباتی هستند که حروف الفبایی پروتئین‌ها را تشکیل می‌دهند. چون ظرفیت و پتانسیل نام‌حدودی در توالی و طول زنجیره آمینواسیدها در تولید پروتئین‌ها وجود دارد، از این‌رو انواع بی‌شماری از پروتئین‌ها را به دست می‌دهند (شکل ۱) [۲].



شکل ۱: آزمایش استنلی میلر در تهیه آمینواسیدها از متان، آمونیاک، بخار آب و هیدروژن در حضور هوا (اکسیژن و نیتروژن)

اگر پاسخ این سؤال که "مولکول‌هایی که آینده را تغییر خواهند داد کدامند؟" این باشد که مولکول‌های شیمیایی از میان مایعات آب و در میان گازها متان، دی‌اکسید کربن، آمونیاک، اکسیژن، نیتروژن و هیدروژن می‌باشد، شاید برای همه از این منظر که آب مایع حیات است بدیهی باشد، اما ممکن است اهمیت سایر مولکول‌ها خیلی روشن و قابل‌فهم نباشد. گرچه اهمیت آب در این مقاله صرفاً جنبه حیاتی آن نیست، چون که این مهم بر همگان روشن است و در مورد اکسیژن (هوا) و سایر مولکول‌ها و عناصر نیز همین حیاتی بودن مطرح است. به‌عنوان مثال آهن نقش مهمی در حیات موجودات زنده دارد و زندگی بدون آهن در سلول‌ها، همانند آن است که سلول‌ها بدون اکسیژن یا آب بقا پیدا کنند. بنابراین، اهمیت مولکول‌های آب، متان، دی‌اکسید کربن، آمونیاک، اکسیژن، نیتروژن و هیدروژن در این مقاله بیشتر از این جنبه است که به دلیل تأثیرگذاری و نقش‌آفرینی این مولکول‌ها در آینده تغییرات اقلیمی، موضوع تحقیق و پژوهش دانشمندان و فناوری‌های بیشتری خواهند شد. به‌طوری‌که نشان‌های علمی و فنی به کسانی تعلق خواهد گرفت که در این حوزه و در رابطه با این مولکول‌ها به تحقیق و پژوهش می‌پردازند. لذا در این مقاله تلاش می‌شود نشان داده شود چرا و چگونه این مولکول‌ها در آینده تأثیر گذارند و بیشتر موضوع پژوهش‌ها، تحقیقات و فناوری‌های در آینده خواهند شد.

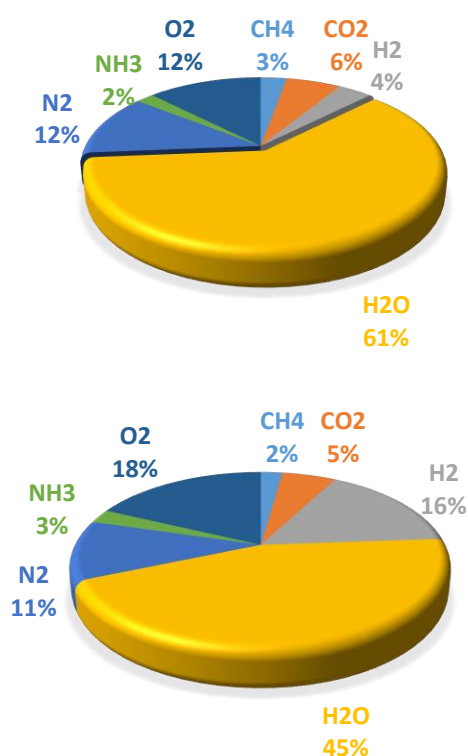
اتم‌های سازنده این مولکول‌ها عبارت‌اند از چهار عنصر هیدروژن، کربن، نیتروژن و اکسیژن که نسبت عنصری این مولکول‌ها به ترتیب ۹، ۲، ۱ و ۳ با مجموع ترکیب کلی عنصری $\text{H}_9\text{C}_2\text{NO}_3$ می‌باشد. جالب اینکه پیش ماده این اتم‌ها از درصد فراوانی بسیار بالایی در طبیعت برخوردارند. برای هیدروژن پیش ماده آب و متان، برای کربن پیش ماده مواد آلی و دی‌اکسید کربن است و برای نیتروژن و اکسیژن نیز عمده پیش‌ماده‌ها به ترتیب گازهای نیتروژن و اکسیژن در جو و یا در مولکول آب می‌باشد.

پیش ماده‌های عناصر هیدروژن، کربن و اکسیژن یعنی مولکول‌های آب، دی‌اکسید کربن و اکسیژن در فرایند فتوسنتز در حضور کاتالیزور کلروفیل و با تابش نور خورشید به‌عنوان

¹ Stanley Miller

جایگاه هر یک از هفت مولکول

نتایج نشان می‌دهد که سهم ایران در اغلب موارد حتی کمتر از شاخص جمعیتی می‌باشد. ایران در ذخایر گاز طبیعی از جمله رتبه اول جهان را دارد و این ذخایر یک مزیت مطلق برای کشور محسوب می‌شود. متان خوراک بسیاری از فرایندهای پتروشیمیایی است و واحدهای صنعتی پتروشیمیایی متعددی در این رابطه در کشور احداث شده است. لذا انتظار می‌رود متان یکی از اولویت‌های اصلی پژوهش در کشور باشد و جایگاه ایران در تولید علم در رابطه با متان تکریمی شود.



شکل ۲: توزیع اسناد منتشر شده در رابطه با هر یک از مولکول‌های آب، متان، دی‌اکسید کربن، آمونیاک، اکسیژن، نیتروژن و هیدروژن در مرکز داده‌های اسکاپوس (در عنوان، چکیده و کلیدواژه) - ایران (بالا) و جهان (پایین).

۱- آمونیاک

پیش‌ماده صنعتی تأمین مواد مغذی نیتروژن‌دار (از قبیل کودهای اوره و...) در صنعت کشاورزی به‌طور انحصاری آمونیاک می‌باشد. مقدار تولید جهانی آمونیاک بالغ بر ۱۵۰ میلیون تن در سال می‌باشد که بیش از ۶۰ درصد از آن در کشاورزی به‌عنوان

بررسی اسناد علمی منتشر شده در رابطه با مولکول‌های آب، متان، دی‌اکسید کربن، آمونیاک، اکسیژن، نیتروژن و هیدروژن در مرکز داده‌های اسکاپوس^۱ نشان می‌دهد که رشد مقالات در رابطه با هر یک از این مولکول‌ها نمایان است و جمعاً ۷۶۷۴۵۹۲ سند در مورد آنها منتشر شده است. آب با ۴۵ درصد بیشترین سند و کمترین سند با ۲ درصد مربوط به متان می‌باشد. مولکول‌های اکسیژن، هیدروژن، نیتروژن، دی‌اکسید کربن و آمونیاک به ترتیب با ۱۸، ۱۶، ۱۱، ۵ و ۳ درصد در رتبه‌های بعدی قرار می‌گیرند. رتبه‌های اول و دوم از نظر تعداد سند در مورد همه مولکول‌ها به ترتیب به کشورهای آمریکا و چین اختصاص دارد. سه کشور بعدی با بهترین رتبه در بیشتر موارد به ترتیب مربوط به ژاپن، آلمان و انگلیس می‌باشد (شکل ۲).

ایران با انتشار ۷۴۵۲۰ سند حدود یک درصد از اسناد منتشر شده در جهان را در مورد این مولکول‌ها به خود اختصاص داده است. توزیع اسناد منتشر شده در مورد این مولکول‌ها نشان می‌دهد، آب با ۶۱ درصد بیشترین سند و کمترین سند با ۲ درصد مربوط به آمونیاک می‌باشد. مولکول‌های اکسیژن، نیتروژن، دی‌اکسید کربن، هیدروژن و متان به ترتیب با ۱۲، ۱۲، ۶، ۴ و ۳ درصد در رتبه‌های بعدی قرار می‌گیرند (شکل ۲).

رتبه جهانی ایران در انتشار مقالات در رابطه با مولکول‌های آب، متان، دی‌اکسید کربن، آمونیاک، اکسیژن، نیتروژن و هیدروژن به ترتیب ۱۷، ۱۹، ۲۲، ۲۳، ۲۵، ۲۱ و ۲۰ می‌باشد. گرچه بخش عمده‌ای از این اسناد در حوزه استراتژیک و مورد نظر در این مقاله نمی‌باشد، اما بر اساس همین اطلاعات نه‌چندان ارتباط با موضوع، رتبه جهانی ایران در همه موارد از رتبه جهانی تولید علم که ۱۶ است پائین‌تر می‌باشد.

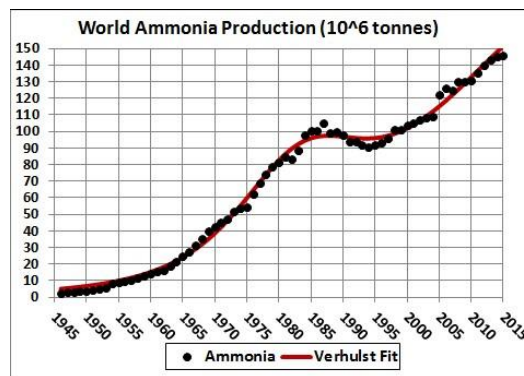
در ضمن سهم ایران در تولید جهانی علم در مورد مولکول‌های آب، متان، دی‌اکسید کربن، آمونیاک، اکسیژن، نیتروژن و هیدروژن به ترتیب ۱/۳، ۱/۲، ۱، ۰/۷، ۰/۶، ۱ و ۰/۲ می‌باشد. علیرغم اینکه در مورد کشورهای برخوردار از سرمایه‌های نیروی انسانی متخصص و منابع طبیعی از قبیل گاز، نفت و معادن، شاخص جمعیت چندان معیار مناسبی نمی‌باشد، اما این

^۱ Scopus

پیش ماده برای تولید مواد مغذی نیتروژنی استفاده می‌شود (شکل ۳).

تناسب رشد جمعیت و مقدار مصرف مواد مغذی در کشاورزی در شکل ۴ ارائه شده است. این نمودار نشان می‌دهد با افزایش جمعیت میزان مصرف مواد مغذی نیتروژنی رو به فزونی است و شیب افزایش آن نسبت به شیب افزایش جمعیت تندتر می‌باشد. نکته مهمی که باید به آن اشاره کرد ناپایداری مواد مغذی نیتروژن‌دار در خاک است که برخلاف فسفر و پتاسیم، در خاک تجزیه و به نیتروژن تبدیل می‌شود و لذا مستلزم تجدید در مصرف است.

با توجه به محدودیت و کمبود مواد مغذی نیتروژن‌دار در طبیعت، تأمین نیاز غذایی جمعیت حدود هفت میلیاردی جهان، امروز بدون توسل به روش‌های صنعتی امکان‌پذیر نمی‌باشد. اختراع فرایند هابر-بوش در تولید صنعتی آمونیاک از نیتروژن و هیدروژن انقلابی در صنعت کشاورزی و تغییر بنیادین در تأمین مواد غذایی بشر به وجود آورده است. به عبارتی جمعیت

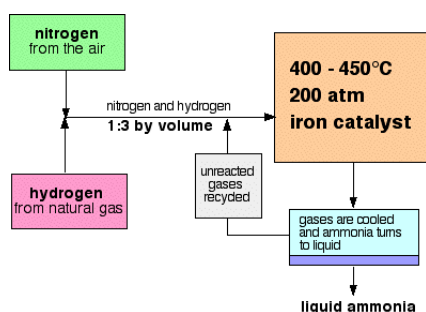


شکل ۳: روند رشد و میزان تولید آمونیاک در جهان

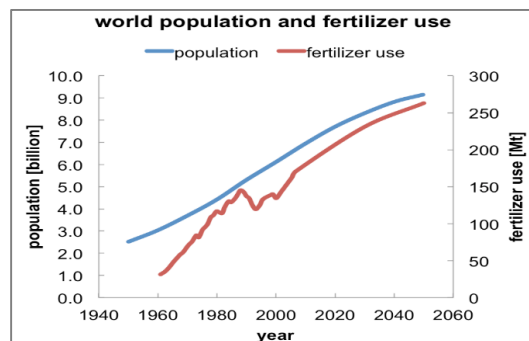
فعلی و آتی مدیون فرایند انحصاری هابر-بوش می‌باشند. امروز از فرایند هابر-بوش که در سال ۱۹۱۴ میلادی معرفی شده است [۳]، برای تولید آمونیاک که پیش ماده تهیه مواد مغذی نیتروژن‌دار است در کشاورزی استفاده می‌شود. آمونیاک در طی این فرایند از ترکیب گازهای نیتروژن طبیعی و هیدروژن تهیه می‌شود. شرایط انجام این واکنش بسیار سخت و در فشار ۱۵۰-۲۵۰ اتمسفر و در دمای ۴۰۰-۶۰۰ درجه سانتی‌گراد از گازهای نیتروژن و هیدروژن در حضور کاتالیزوری با پایه آهن به دست می‌آید (شکل ۵).

گاز هیدروژن مورد نیاز این فرایند تحت شرایط نسبتاً سخت و طی یک واکنش گرماگیر از متان تولید می‌شود. در طی فرایند تبدیل متان به هیدروژن مقدار زیادی دی‌اکسید کربن تولید می‌شود که مقدار آن در سال ۲۰۱۵ میلادی حدود ۷۰ میلیون تن گزارش شده است. در ضمن حدود یک الی دو درصد از کل انرژی مصرفی در جهان به این فرایند اختصاص می‌یابد.

علیرغم اینکه بیش از یک قرن از اختراع فرایند هابر-بوش می‌گذرد، کماکان شیمی کربن مرکز ثقل پژوهش‌ها و فناوری‌هاست، اما در شیمی نیتروژن و فرایند هابر-بوش تغییرات بسیار جزئی به وجود آمده که این عدم تغییر ناشی از عوامل زیر است: الف-انحصاری و بی‌بدیل بودن فرایند هابر-بوش، ب- استحکام بسیار بالای پیوند در نیتروژن مولکولی که فعالیت شیمیایی آن را به شدت کاهش داده است، ج- نیتروژن به‌عنوان ارزان‌ترین و فراوان‌ترین منبع نیتروژنی در طبیعت (۷۸ درصد هوای جو را نیتروژن تشکیل می‌دهد) به‌عنوان خوراک



شکل ۵: فرایند هابر-بوش در تولید آمونیاک از گازهای نیتروژن و هیدروژن در حضور کاتالیز پایه آهن

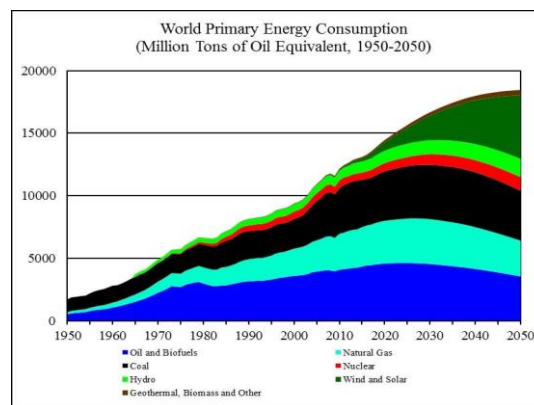


شکل ۴: نمودار رشد جمعیت و مصرف مواد شیمیایی مغذی (کودهای شیمیایی سنتزی) تا سال ۲۰۶۰ میلادی

¹ Haber-Bosch process

در فرایند هابر-بوش، این فرایند با تمام امتیازاتی که از قبیل انحصاری بودن در تولید آمونیاک در یک قرن گذشته تا به امروز، عامل انقلاب صنعتی در کشاورزی، بزرگ‌ترین اکتشاف در قرن بیستم و یک فرایند اساسی و حیاتی برای زندگی بشر است، اما عاری از مشکلات و چالش‌هایی جدی نمی‌باشد که برخی از آنها عبارت‌اند از:

الف- مصرف بسیار بالای انرژی در فرایند، به‌طوری‌که یک الی دو درصد کل انرژی تولید سالانه انرژی در جهان صرف فرایند هابر-بوش می‌شود (در سال ۲۰۱۶ مقدار انرژی مصرفی جهان ۱۴۶۰۰۰ تراوات ساعت^۱ معادل $1/46 \times 10^{14}$ کیلو وات ساعت بوده است) (شکل ۶).



شکل ۶: سهم هریک از منابع انرژی در انرژی مصرفی جهان

ب- محدودیت فرایند هابر-بوش به سوخت‌های فسیلی از قبیل متان برای تأمین هیدروژن مورد نیاز در تولید آمونیاک که به دلیل تولید دی‌اکسید کربن در این فرایند، عواقب محیط زیستی بسیار زیانباری را به دنبال دارد. در این فرایند به ازای تولید هر تن آمونیاک، تقریباً دو تن دی‌اکسید کربن تولید می‌شود (به نسبت هشت مول آمونیاک سه مول دی‌اکسید کربن).

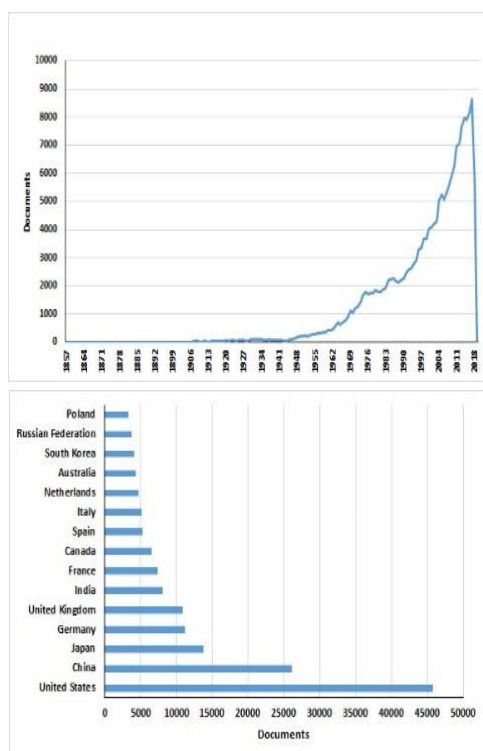
ج- سه الی پنج درصد گاز طبیعی تولیدی در جهان به این فرایند اختصاص می‌یابد.

با توجه به این چالش‌ها، پرسش این است: آیا نمی‌توان روش یا روش‌های برای تولید آمونیاک ارائه داد که طی آن مصرف انرژی تولید این پیش‌ماده استراتژیک درصدی کاهش یابد؟ و یا اینکه منابع جدیدی مثل آب در تأمین گاز هیدروژن مورد

نیاز در فرایند هابر-بوش جایگزین متان شود تا از تولید حجم عظیم دی‌اکسید کربن ممانعت به عمل آید؟ و یا اینکه آیا نمی‌شود قالب فکری فعلی تولید آمونیاک از هیدروژن و نیتروژن تغییر داده شود و با روش و یا پیش‌ماده‌های دیگر تأمین منابع نیتروژنی کرد و به قول معروف طرح نو انداخت؟ رشد نمایی اسناد علمی منتشر شده در جهان در رابطه با آمونیاک و رتبه پانزده کشور که بیشترین اسناد را منتشر کرده‌اند در شکل ۷ ارائه شده است. سهم ایران در این تولید جهانی ۰/۷۴ درصد می‌باشد.

۲- متان

مواد سازنده و تشکیل‌دهنده طبیعت در جهان آفرینش دو بخشی است. بخشی متشکل از مواد معدنی و بخشی دیگر مواد آلی. گرچه بخش معدنی جهان هستی از نظر تعدد عنصری بسیار متنوع است، اما بخش آلی از وحدت و یگانگی عنصری برخوردار است؛ به‌طوری‌که عنصر کربن که شاخص آلی بودن ترکیبات تلقی می‌شود، تنها عنصر اصلی بخش آلی حیات



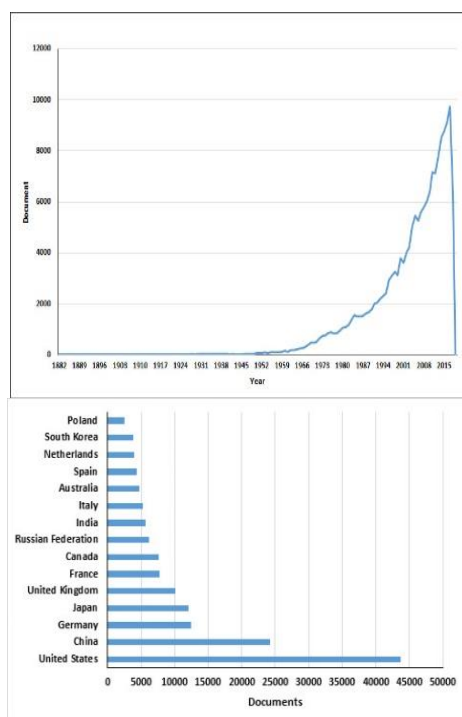
شکل ۷: رشد نمایی اسناد علمی منتشر شده در رابطه با آمونیاک در جهان و رتبه پانزده کشور با بیشترین اسناد علمی

¹ TeraWatt-hours (TWh)

عمدتاً به‌طور صنعتی سنتز می‌شود به‌صورت طبیعی وجود دارد و به عبارتی طی فرایندهای تخریبی و تخمیری از مواد آلی گیاهی و جانوری تولید می‌شود. گرچه آمونیاک نیز طی فرایندهای تخمیری و تخریبی از منابع طبیعی به دست می‌آید، اما مقدار آن نسبت به متان بسیار محدودتر و از همه مهم‌تر برخلاف متان که دارای ذخایر غنی زیرزمینی به‌صورت طبیعی وجود دارد در مورد آمونیاک این مهم دیده نمی‌شود.

با توجه به چالش‌های فعلی در استفاده غیرمستقیم از متان و برخورداری از منابع غنی از آن، آیا نمی‌توان متان را مستقیماً به فراورده‌های ارزشمند تبدیل کرد؟ [۶، ۵] یا اینکه تأمین انرژی از طریق متان با سایر منابع انرژی که سبزند جایگزین شود تا جامعه با چالش تولید حجم انبوهی از دی‌اکسید کربن مواجه نشود؟

رشد نمایی اسناد علمی منتشر شده در جهان در رابطه با متان و رتبه پانزده کشور که بیشترین اسناد را منتشر کرده‌اند در شکل ۸ ارائه شده است. سهم ایران در این تولید جهانی ۱/۲ درصد می‌باشد.



شکل ۸: رشد نمایی اسناد علمی منتشر شده در رابطه با متان در جهان و رتبه پانزده کشور با بیشترین اسناد علمی

است. در مواد معدنی نیز به‌ظاهر ترکیبات کربنی یافت می‌شود از جمله اوره‌ها، کربنات‌ها و...؛ اگر آنها نیز خوب واریسی شوند علیرغم اطلاق معدنی به آنها، منشأ آلی دارند. چرا که منوکسید و دی‌اکسید کربن از سوختن ترکیبات آلی یا در پی پدیده فتوسنتز به دست می‌آید و طی فرایندهای شیمیایی تبدیل به اوره و کربنات‌ها می‌شوند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت علیرغم تنوع در عناصر بخش معدنی جهان هستی، عنصر اصلی بخش آلی حیات از عنصر کربن تشکیل می‌شود.

ساده‌ترین ترکیب آلی کربنی متان است و یکی از پایدارترین مولکول‌های آلی از نقطه‌نظر استحکام پیوند محسوب می‌شود، به‌طوری‌که انرژی تفکیک پیوند C-H در متان ۱۰۵ کیلوکالری بر مول است و یکی از قوی‌ترین پیوندها در ترکیبات آلی محسوب می‌شود. بر اساس یک محاسبات سرانگشتی، نیمه‌عمر شکست جور پیوند C-H در متان بیش از 1×10^{24} سال در دمای اتاق تخمین زده می‌شود (بر اساس معادله آرنیوس و با فرض اینکه ضریب پیش نمایی در معادله آرنیوس برای فرایندهای تک‌مولکولی 1×10^{13} در نظر گرفته شود). با توجه به اینکه عمر جهان هستی 1×10^{10} سال تخمین زده می‌شود، لذا نیمه‌عمر گسست جور پیوند C-H در متان و در دمای اتاق 1×10^{14} مرتبه طولانی‌تر از عمر جهان هستی است. لذا می‌توان گفت متان یکی از پایدارترین ترکیبات کربنی است و بی‌دلیل نیست که بیش از ۷۰ درصد گاز طبیعی را متان تشکیل می‌دهد و یکی از مولکول‌های منشأ حیات می‌باشد. به عبارتی فراوانی متان در طبیعت که ناشی از پایداری آن است، خود نشانی از تبدیل مواد آلی در طبیعت به متان است (ذخایر گاز طبیعی جهان حدود $187/1 \times 10^{11}$ مترمکعب تخمین زده می‌شود که حدود ۷۰ درصد آن را متان تشکیل می‌دهد. در ضمن ذخایر جهانی زغال‌سنگ $786/1 \times 10^7$ تن است. ذخایر جهانی "هیدرات متان" بیش از دو برابر مجموع ذخایر جهانی نفت، گاز و زغال‌سنگ برآورد می‌شود). لذا شاید به نظریه‌ای مبنی بر وحدت ماده همانند وحدت انرژی در حیات دامن زد. با این مفهوم: "منشأ پیدایش حیات گاز متان است و بخش سازنده مواد آلی حیات نیز در پی تخریب و یا تجزیه به متان تبدیل می‌شود". به عبارت دیگر نقطه نهایی و پایانی در تخریب مواد آلی، گاز متان است و تشکیل و سازنده بخش مواد آلی طبیعت نیز گاز متان می‌باشد. در ضمن متان برخلاف آمونیاک که

۳- دی‌اکسید کربن

تولید انرژی و ذخیره‌سازی آن از مسائل بسیار مهم جامعه صنعتی امروز محسوب می‌شود. میزان مصرف انرژی در سال ۲۰۱۰ میلادی ۱۴۰۰۰۰ تراوات ساعت بوده و تخمین زده می‌شود در سال ۲۰۵۰ میلادی به دو برابر افزایش یابد. در یک قرن گذشته سوخت‌های فسیلی یکی از مهم‌ترین منابع تولید انرژی بوده است و تقریباً ۸۰ درصد منابع تولید انرژی را سوخت‌های فسیلی تشکیل می‌دهند.

منشأ اصلی تولید دی‌اکسید کربن سوخت‌های فسیلی است و به ازای هر ۲۴ کیلوگرم هیدروکربن اشیاع هشت کربنی، حدود ۸۱ کیلوگرم دی‌اکسید کربن تولید می‌شود. تولید سالیانه دی‌اکسید کربن بالغ بر $3/5 \times 10^{10}$ تن تخمین زده می‌شود. یکی از نگرانی‌ها و چالش‌های فراروی جوامع صنعتی، مواجهه با این حجم بزرگ از تولید دی‌اکسید کربن می‌باشد که آلودگی و خطرات جبران‌ناپذیری را از گرمایش زمین و آب‌وهوا ... به محیط‌زیست تحمیل می‌کند. در سال‌های اخیر برای کاهش

بحران محیط زیستی ناشی از دی‌اکسید کربن، کوشش‌های در جایگزینی سوخت‌های فسیلی با منابع انرژی سبز و تجدید پذیر از قبیل تولید انرژی‌های بادی، خورشیدی و ... به عمل آمده، اما با توجه به تقاضای فزونی جامعه صنعتی به انرژی، انرژی تولیدی از کلیه این منابع کمتر از ۵ درصد می‌باشد. در ضمن منابع تجدید پذیر محدودیت‌های جغرافیایی، فصلی و ... را نیز به همراه دارند.

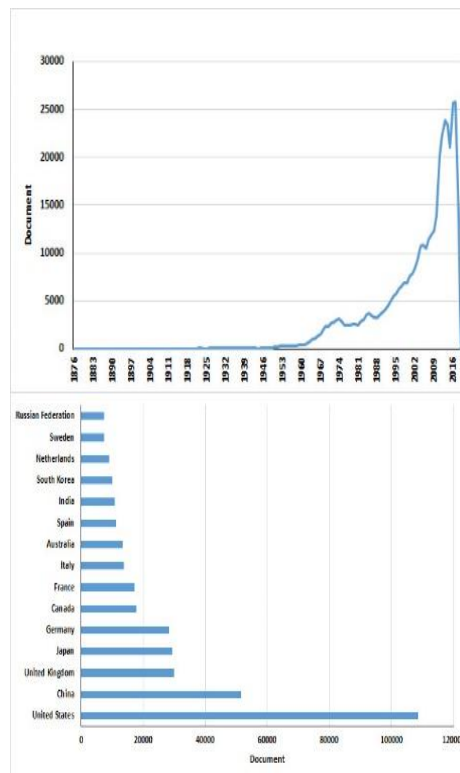
در کنار جایگزینی روش‌های سبز و زیست دوست، تلاش گسترده‌ای برای احیا و تبدیل دی‌اکسید کربن به ترکیبات ارزشمند از قبیل اسید فرمیک، متانول، متان، منواکسید کربن و ... به استفاده از روش‌های الکتروشیمیایی، فوتوشیمیایی، بیوشیمیایی و ترموشیمیایی یا گرما شیمیایی بوده است [۶].

رشد نمایی اسناد علمی منتشر شده در جهان در رابطه با دی‌اکسید کربن و رتبه پانزده کشور که بیشترین اسناد را منتشر کرده‌اند در شکل ۹ ارائه شده است. سهم ایران در این تولید جهانی یک درصد می‌باشد.

۴- هیدروژن

هیدروژن یکی از پاک‌ترین منابع انرژی در جهان شناخته می‌شود و در طی فرایند سوخت آن، آب به‌عنوان فراورده واکنش تولید می‌شود. در صد هیدروژن در طبیعت بسیار اندک است و عملاً فاقد توجیه فنی و اقتصادی برای استفاده از آن در فرایندهای صنعتی است. اما دو منبع و پیش‌ماده مهم برای تولید هیدروژن آب و متان است که به‌طور فراوان وجود دارد. برای تأمین هیدروژن مورد مصرف در فرایند تولید آمونیاک و یا در سایر واحدهای پتروشیمی از متان به‌عنوان پیش ماده استفاده می‌شود که تولید دی‌اکسید کربن یکی از معایب جدی آن محسوب می‌شود. پیش‌بینی می‌شود گاز هیدروژن و روش‌های تولید آن در آینده اهمیت بیشتری پیدا کند و معرفی فرایندهای شیمیایی کاتالیزستی و بیوشیمیایی در تولید هیدروژن از آب و متان که انرژی تولید را کاهش دهد یکی از زمینه‌های تحقیقاتی مهم در آینده شود [۷].

رشد نمایی اسناد علمی منتشر شده در جهان در رابطه با هیدروژن و رتبه پانزده کشور که بیشترین اسناد را منتشر کرده‌اند در شکل ۱۰ ارائه شده است. سهم ایران در این تولید جهانی ۰/۲ درصد می‌باشد.



شکل ۹: رشد نمایی اسناد علمی منتشر شده در رابطه با دی اکسید کربن در جهان و رتبه پانزده کشور با بیشترین اسناد علمی

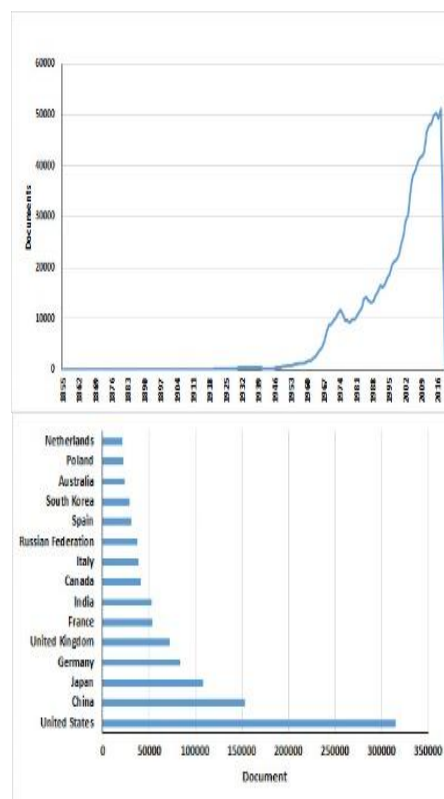
دورنوردی^۱ نامیده می‌شود فراهم شده است [۱۰، ۱۱]. نقش آب در این فناوری بیشتر برجسته شده و انتقال و دورنوردی اطلاعات ژنتیکی دی. ان. ای آدر بستر آب با استفاده از امواج الکترومغناطیسی با فرکانس ۷ هرتز امکان‌پذیر شده است [۱۱]. با افزایش گازهای گلخانه‌ای و تغییرات آب و هوایی و گرمایش زمین پیش‌بینی می‌شود، یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های فراروی بشر در آینده کمبود و بحران آب شیرین باشد. لذا، امروز باید در طراحی و اختراع روش‌های کاتالیستی به منظور کاهش انرژی در تبدیل آب‌های شور به شیرین به طریق تبخیر و تراکم پیشگام بود و پیش‌بینی می‌شود در آینده این حوزه تبدیل به یکی از مهم‌ترین موضوعات پژوهشی شود [۱۲].

رشد نمایی اسناد علمی منتشر شده در جهان در رابطه با آب و رتبه پانزده کشور که بیشترین اسناد را منتشر کرده‌اند در شکل ۱۱ ارائه شده است. سهم ایران در این تولید جهانی ۱/۳ درصد می‌باشد.

۶- اکسیژن و نیتروژن

هر دو گاز اکسیژن و نیتروژن از جمله فراوان‌ترین مواد در طبیعت می‌باشند که تجدید پذیرند. جو کره زمین عمدتاً از گازهای اکسیژن و نیتروژن تشکیل شده و درصد نیتروژن حدود چهار برابر اکسیژن می‌باشد. چنانچه اشاره شد هر دو گاز نقش بسیار مهمی در زندگی و حیات بشری دارد، اکسیژن گاز حیات (تنفس) و فراورده فتوسنتز و نیتروژن تنها منبع تولید صنعتی مواد مغذی نیتروژن دار در کشاورزی برای تهیه غذا در فرایند هابر-بوش می‌باشد.

رتبه پانزده کشور که بیشترین اسناد را در رابطه با اکسیژن و نیتروژن در جهان منتشر کرده‌اند در شکل ۱۲ ارائه شده است. سهم ایران در تولید این اسناد علمی در مورد اکسیژن و نیتروژن به ترتیب ۰/۶ و ۱ درصد می‌باشد.



شکل ۱۰: رشد نمایی اسناد علمی منتشر شده در رابطه با هیدروژن در جهان و رتبه پانزده کشور با بیشترین اسناد علمی

۵- آب

آب یکی از مهم‌ترین مایعات و شاید هم یکی از مهم‌ترین ماده در کره خاکی است. کلیه فرایندهای شیمیایی و بیولوژیکی در بدن موجودات زنده در آب انجام می‌شود. گرچه آب از جمله موادی است که دارای بیوگرافی است [۸]، اما هنوز مولکول ناشناخته است و شاید به دلیل بسط و آسان در دسترس همگان بودن آن باشد. حیات و زندگی انسان‌ها در کره خاکی منوط به دو فرایند شیمیایی الف-اکسایش آب و تبدیل آن به اکسیژن طی فرایند فتوسنتز و ب-کاهش اکسیژن و تبدیل آن به آب و دی‌اکسید کربن در فرایند تنفس سلولی می‌باشد [۹]؛ به عبارتی تبدیل متقابل آب و اکسیژن لازم و ملزوم یکدیگر در طبیعت می‌باشد.

با پیشرفت‌های که در علم و فناوری به وجود آمده است، امکان جابجایی ذرات بدون طی مسافت که اصطلاحاً

¹ teleportation

² deoxyribonucleic acid (DNA)

مشترکات این هفت مولکول

الف- از میان هفت مولکول مهم و تأثیر گذار در آینده یعنی آب، متان، اکسیژن، هیدروژن، نیتروژن، دی‌اکسید کربن و آمونیاک، به جز آمونیاک، دی‌اکسید کربن و هیدروژن که بخش عمده‌ای از آنها صنعتی تولید می‌شوند، به‌طور طبیعی در طبیعت وجود دارند و در صد فراوانی آنها بسیار بالا می‌باشد. به عبارت دیگر تولید دی‌اکسید کربن به عنوان گاز گلخانه‌ای قابل مهار می‌باشد.

ب- برخی از این مولکول‌ها از پایداری بسیار بالایی برخوردارند، به طوری که برخی از آنها قبل از پیدایش زمین وجود داشتند و حتی منشأ حیات می‌باشند. به عبارتی مولکول‌های پایدار و ماندگارند.

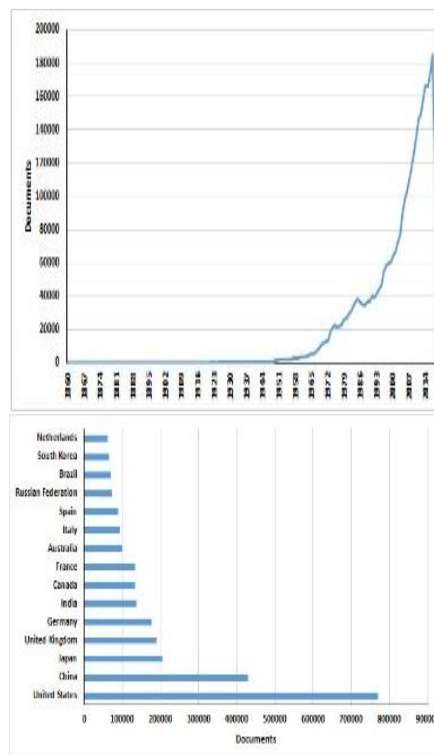
ج- برخی از این مولکول‌ها از جمله دی‌اکسید کربن اجزای سازنده اصلی یکی از مهم‌ترین فرایندهای طبیعت یعنی فتوسنتز می‌باشند. به عبارتی تا حدودی مقداری دی‌اکسید کربن طی این فرایند در طبیعت کنترل می‌شود و با تمهیداتی می‌توان مقدار آن را کاهش داد.

د- از همه مهم‌تر این مولکول‌ها در زنجیره حیات به یکدیگر تبدیل می‌شوند و به شکلی لازم و ملزوم یکدیگر می‌باشند. لذا به نظر می‌رسد برای غلبه بر مسائل و مشکلات و چالش‌ها که ناشی از کاهش و یا افزایش این مولکول‌هاست، ضروری باشد به آنها به صورت یک بسته توجه و مورد بررسی قرار گیرند.

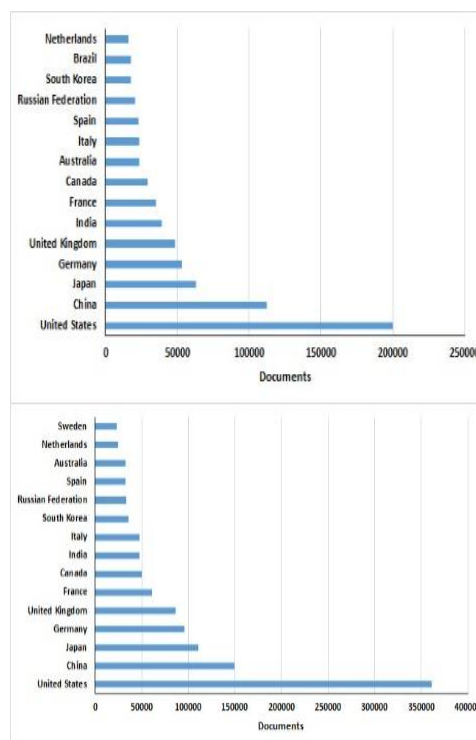
چالش‌ها، راهکارها و پیشنهادات

شاخص‌های توسعه پایدار یک جامعه اگر دیروز دسترسی آسان به آب، غذا، بهداشت و امنیت بود، امروز انرژی و هوای پاک نیز به آنها افزوده شده است. وابستگی این شاخص‌ها به مولکول‌های آب، متان، دی‌اکسید کربن، آمونیاک، اکسیژن، نیتروژن و هیدروژن روز به روز به‌طور مستقیم و یا غیرمستقیم رو به افزایش می‌باشد به طوری که:

- تغییرات آب و هوایی، افزایش آلاینده‌ها از جمله افزایش گازهای گلخانه‌ای - دی‌اکسید کربن - و وضع مقرراتی که مصرف سوخت‌های فسیلی - متان - را محدودتر می‌سازد (گرچه اتمام و تجدید ناپذیر بودن سوخت‌های فسیلی هم خود مسئله



شکل ۱۱: رشد نمایی اسناد علمی منتشر شده در رابطه با آب در جهان و رتبه پانزده کشور با بیشترین اسناد علمی



شکل ۱۲: رتبه پانزده کشور با بیشترین اسناد علمی در رابطه با نیتروژن (بالا) و اکسیژن (پایین)

ایست)، یکی از نگرانی‌ها و چالش‌هایی است که جامعه صنعتی امروزی برای توسعه پایدار با آن مواجه است.

- نیاز روزافزون به انرژی و رشد نمایی مصرف آن در جامعه صنعتی امروزی و اینکه بیش از ۸۰ درصد تأمین منابع انرژی از سوخت‌های فسیلی - از جمله متان - و همراه با تولید حجم و سیعی از گازهای گلخانه‌ای - دی‌اکسید کربن - است و خود چالش مهم‌تر دیگری است که جامعه صنعتی امروز با آن مواجه است.

- مقدار بسیار محدود آب شرب (هفت هزارم درصد از کل آب‌های کره زمین) و کشاورزی و کاهش آن به دلایل تغییرات آب‌هوایی ناشی از گازهای گلخانه‌ای، افزایش جمعیت، الگوی مصرف نامناسب و...، جوامع را به سمتی سوق می‌دهد که یکی از عوامل کشمکش‌ها و مشکلات آتی در جهان است.

- افزایش جمعیت و بالطبع افزایش نیاز به غذا و مواد مغذی نیتروژن‌دار - آمونیاک - در کشاورزی و شیب تند مصرف مواد مغذی نیتروژن‌دار در کشاورزی نسبت به شیب تند رشد جمعیت از بحران‌های آتی دیگر می‌باشد.

- شیب تند افزایش مصرف انرژی در جهان و وابستگی شدید امنیت غذایی به فرایندهای کهنه و سنتی از قبیل فرایند هابر-بوش در تولید آمونیاک از گازهای هیدروژن و نیتروژن که یک الی دو درصد انرژی مصرفی در جهان و سه الی پنج درصد گاز طبیعی تولیدی در جهان را به خود اختصاص می‌دهد از دیگر مسائل و مشکلات جمعیت هفت میلیاردی است.

چه باید کرد؟

پاسخ این سؤال به‌ظاهر دشوار را قطعاً باید از محققان و دانشمندان، مراکز علمی و دانشگاه‌ها و با حمایت دولت‌ها و با برنامه‌ریزی و سیاست‌گذاری و با نگاه به آینده جست‌وجو کرد. در سال‌های اخیر بهبود روش هابر-بوش و جایگزین کردن متان مورد مصرف در آن با آب و کاهش انرژی مصرفی فرایند یکی از اولویت‌های پژوهشی بوده و تاکنون روش‌های آزمایشگاهی متعددی مبتنی بر روش‌های کاتالیستی از قبیل استفاده از کاتالیست‌های هموزن، هتروژن، فرایندهای فوتو- و الکتروکاتالیستی، فرایند آزیمی و استفاده از روش پلاسما در جایگزین متان با آب و کاهش انرژی فرایند ارائه شده است، اما

تاکنون هیچ‌یک از این روش‌ها قابل‌رقابت با روش صنعتی فعلی هابر-بوش نمی‌باشد و نیازمند پژوهش بیشتر در ارتقای کارایی روش، بهبود کاتالیست و کاهش انرژی فرایند می‌باشد. بدیهی است موفقیت در جایگزینی آب با توجیه فنی و اقتصادی مناسب به‌عنوان منبع تولید هیدروژن مورد نیاز فرایند هابر-بوش با توجه به فراوانی، ارزان و سبب بودن و بالطبع به دلیل عدم تولید گازهای گلخانه‌ای، انقلاب علمی دیگری در کشاورزی را به دنبال خواهد داشت. لازم به یادآوری در تولید آمونیاک و هیدرازین از آب و گاز نیتروژن با استفاده از سلول‌های خورشیدی در دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد و یا استفاده از میکروب‌ها در تولید مواد مغذی نیتروژن‌دار موفقیت‌های به دست آمده است [۱۳، ۱۴].

یکی از چالش‌های فراوری کشورمان و شاید اغلب کشورها کم‌آبی است. یکی از حوزه‌های تحقیقاتی استفاده از انرژی خورشیدی در فرایندهای فوتوکاتالیستی و فوتوترمالی در تبدیل آب شور دریاها به آب شیرین با کاهش مصرف انرژی فرایند تبخیر آب و تراکم بخارات و استفاده از آن به‌عنوان آب شرب و یا در کشاورزی - گلخانه‌ها - است [۱۵]. انرژی خورشید یکی از مهم‌ترین منابع انرژی تجدیدپذیر در تأمین انرژی مورد نیاز در توسعه پایدار جهان می‌باشد.

- برنامه‌ریزی و شناخت فرصت‌ها و چالش‌ها در تأمین منابع انرژی تجدیدپذیر پاک و پایدار از قبیل انرژی‌های خورشیدی، آبی، بادی و مهندسی میکروبی در جای‌گزینی با سوخت‌های فسیلی از دیگر اقداماتی است که باید در مراکز علمی و فنی نهادینه شود [۱۶، ۱۷].

- ایران در ذخایر گاز طبیعی از جمله متان رتبه اول جهان را دارد و یک مزیت مطلق برای کشور محسوب می‌شود. بر پایه متان به‌عنوان خوراک فرایندهای پتروشیمیایی، واحدهای صنعتی متعددی در پتروشیمی کشور احداث شده است. لذا انتظار می‌رود یکی از اولویت‌های پژوهشی کشور در رابطه با گاز متان باشد. چنانچه در آمریکا پژوهشکده‌ای تحت عنوان انستیتو تحقیقاتی هیدروکربن‌ادر سال ۱۹۷۴ میلادی تأسیس شده و دارای پیشرفته‌ترین تجهیزات تحقیقاتی است و بخش عمده‌ای از فعالیت‌های این مرکز تحقیقاتی به پژوهش‌های

¹ Hydrocarbon Research Institute

برنامه‌ریزی و سیاست‌گذاری به منظور تشویق برای تحقیق و پژوهش در رابطه با این مسائل مهم و معتابه جامعه را به عمل آورد. امید است این نوشته تلنگری به بخشی از وظایف ذاتی جامعه علمی و فنی، دانشگاه‌ها و سیاست‌گذاران علمی و فنی و مدیریت علمی و فنی کشور در جهت اولویت دادن پژوهش‌ها به این مولکول‌ها باشد.

تقدیر و تشکر

از دانشگاه شهید بهشتی که فرصتی را برای اینجانب فراهم کرد تا به مسائلی فراتر از بحث کلامیک درس و مشق پرداخته شود و همچنین از استاد محترم جناب آقای دکتر موسوی موحدی که حوصله به خرج دادند و پیش‌نویس مقاله را به دقت مطالعه کردند و پیشنهادات ارزنده‌ای در جهت ارتقای کیفی آن ارائه فرمودند کمال تشکر را دارم.

پایگاه داده‌های دیده شده در این مقاله

1. <https://www.chemguide.co.uk/physical/equilibria/haber.html>
2. <http://large.stanford.edu/courses/2014/ph240/yuan2>
3. <https://www.chemguide.co.uk/physical/equilibria/haber.html>
4. <https://seekingalpha.com/article/4083393-world-energy-2017-minus-2050-annual-report>
5. <https://www.bp.com/content/dam/bp/en/corporate/pdf/energy-economics/statistical-review-2017/bp-statistical-review-of-world-energy-2017-full-report.pdf>
6. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Total_World_Energy_Consumption_by_Source_2013.png
7. <http://greencleanguide.com/earths-water-distribution-and-indian-scenario/>
8. <http://loker.usc.edu/>
9. <https://www.mediathèque.lindau-nobel.org/videos/31544/dna-between-physics-and-biology-2010/laureate-montagnier>
10. https://arxiv.org/PS_cache/arxiv/pdf/1012/1012.5166v1.pdf
11. https://21sci-tech.com/Articles_2011/Winter-2010/Montagnier.pdf
12. <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/306/1/012007/meta>

بنیادی در رابطه با هیدروکربن‌ها از جمله متان اختصاص دارد. ریاست این مرکز تا سال ۲۰۱۷ میلادی به عهده آقای جورج ا. الیه (برنده جایزه نوبل شیمی سال ۱۹۹۴ میلادی بود که در سال ۲۰۱۷ میلادی چشم از جهان فرو بست. - با توجه به اینکه گاز هیدروژن یکی از پاک‌ترین منابع انرژی در جهان محسوب می‌شود، تولید آن طی فرایندهای الکتروکاتالیستی و به‌ویژه فوتوکاتالیستی از آب به‌عنوان فراوان‌ترین مولکول با استفاده از انرژی خورشید به‌عنوان غنی‌ترین منبع انرژی باید یکی از اولویت‌های پژوهشی مراکز تحقیقاتی و دانشگاهی کشور قرار گیرد. [۱۸-۲۰]

نتیجه‌گیری

بدیهی است کاهش گاز گلخانه‌ای یا دی‌اکسید کربن، تأمین آب شیرین از آب شور، کاهش انرژی مصرفی در فرایند هابر-بوش در تولید آمونیاک و... همه و همه در چنبره این هفت مولکول که گذشته را بنیان نهادند، امروز یک‌ه‌تاز میدان‌اند و آینده را تأثیر گذارند نهفته است. به عبارتی مرکز ثقل رفع این چالش‌ها و تلاش در دستیابی به روش‌های مؤثر برای حل آنها، در سه چرخه و فرایند خلاصه می‌شود.

- چرخه آب، اساس پیل‌های سوختی در تجزیه فوتو- و الکتروکاتالیستی آب [۷] و تأمین انرژی پاک و منبع تولید هیدروژن در فرایند تولید آمونیاک در جایگزینی با متان می‌باشد.

- چرخه کربن، اساس کاهش و احیای دی‌اکسید کربن در تبدیل به متان، متانول و... را تشکیل می‌دهد [۲۱].

- چرخه تبدیل آب شور دریاها و اقیانوس‌ها به آب شیرین، با بهره‌گیری از انرژی خورشید طی فرایندهای فوتوکاتالیستی و فوتوترمالی (نور گرمایی) [۱۵]

با توجه به اینکه اصلاح روش‌های فعلی و ابداع روش‌های جدید عمده‌تأ مبتنی بر فرایندهای کاتالیستی است، لذا سیاست‌های تشویقی و حمایت از پروژه‌های پایه‌ای و فناورانه در رابطه با این مولکول‌ها در جهت کاهش چالش‌ها باید در اولویت قرار گیرد. لذا پیشنهاد می‌شود در کشور خودمان مجموعه‌ای همانند ستاد نانو و یا همان مجموعه فعلی،

¹ George A. Olah

² خورشید سالیانه تقریباً 3×10^{24} ژول انرژی قابل استفاده فراهم می‌کند که حدود ۱۰۰۰۰ مرتبه بیش از انرژی مورد نیاز فعلی جهان می‌باشد.

- [12]. Wang, Y., Wang, C., Song, X., Huang, M., Megarajan, S. K., Shaukatd, S. F., Jiang, H. (2018). Improved Light-harvesting and Thermal Management for Efficient Solar-driven Water Evaporation Using 3D Photothermal Cones, *Journal of Materials Chemistry A*, Vol. 6, PP. 9874-9881.
- [13]. News (1977). Prototype Solar Cell Used in Ammonia Process, *Chemical Engineering News*, Vol. 55, No.40, PP. 19-20.
- [14]. Pikaar, I., Matassa, S., Rabaey, K., Bodirsky, B. L., Popp, A., Herrero, M., Verstraete, W. (2017). Microbes and the Next Nitrogen Revolution, *Environmental Science & Technology*, Vol.51, No.13, PP. 7297-7303.
- [15]. Zhu, L., Gao, M., Peha, C. N. K., Ho, G. W. (2018). Solar-Driven Photothermal Nanostructured Materials Designs and Prerequisites for Evaporation and Catalysis Applications, *Materials Horizons*, Vol.5, No.3, PP. 323-343.
- [16]. Chu, S., Majumdar, A. (2012). Opportunities and Challenges for a Sustainable Energy Future, *Nature*, Vol.488, No.7411, PP. 294-303.
- [17]. Seh, Z. W., Kibsgaard, J., Dickens, C. F., Chorkendorff, I., Nørskov, J. K., Jaramillo, T. F. (2017). Combining Theory and Experiment in Electrocatalysis: Insights into Materials Design, *Science*, Vol.355, No.146, PP. 1-12.
- [18]. Chen, X., Shen, S., Guo, L., Mao, S. S. (2010). Semiconductor-based Photocatalytic Hydrogen Generation, *Chemical Reviews*, Vol.110, No.11, PP. 6503-6570.
- [19]. Xu, Y., Kraft, M., Xu, R., (2016). Metal-free Carbonaceous Electrocatalysts and Photocatalysts for Water Splitting, *Chemical Society Review*, Vol.45, No.11, PP. 3039-3052.
- [20]. Yuan, Y-J., Yu, Z-T., Chen, D-Q., Zou, Z-G. (2017). Metal-complex Chromophores for Solar, *Chemical Society Review*, Vol.46, No.3, PP. 603-631.
- [21]. Sakakura, T., Choi, J. C., Yasuda, H. (2007). Transformation of Carbon Dioxide, *Chemical Reviews*, Vol.107, No.6, PP. 2365-2387.
- [1]. Barber, J., Tran, P. D. (2013). From Natural to Artificial Photosynthesis, *Journal of the Royal Society Interface*, Vol.10, No.81, PP. 20120984.
- [2]. Miller, S. L. (1955). Production of Some Organic Compounds under Possible Primitive Earth Conditions, *Journal of the American Chemical Society*, Vol.77, No.9, PP. 2351-2361.
- [3]. Haber, F., Rossignol, R. L. (1913). The Production of Synthetic Ammonia, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, Vol.5, No.4, PP. 328-331.
- [4]. Schwach, P., Pan, X., Bao, X. (2017). Direct Conversion of Methane to Value-Added Chemicals over Heterogeneous Catalysts: Challenges and Prospects, *Chemical Reviews*, Vol.117, No.13, PP. 8497-8520.
- [5]. Shaabani, A., Ghadari, R. (2010). Direct Sulfonation of Methane to Methanesulfonic Acid, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol.49, No.16, PP. 7685-7686.
- [6]. Sakakura, T., Choi, J-C., Yasuda, H. (2007). Transformation of Carbon Dioxide, *Chemical Reviews*, Vol.107, No.6, PP. 2365-2387.
- [7]. Wang, Y., Suzuki, H., Xie, J., Tomita, O., Martin, D. J., Higashi, M., Kong, D., Abe, R., Tang, J. (2018). Mimicking Natural Photosynthesis: Solar to Renewable H₂ Fuel Synthesis by Z-Scheme Water Splitting Systems, *Chemical Reviews*, Vol.118, No.10, PP. 5201-5241.
- [8]. Ball, P. (1999). *Life's Matrix: A Biography of Water*, Farrar, Straus and Giroux, New York.
- [9]. Gray, H. B., Winkler, J. R. (2018). *Living with Oxygen*, *Accounts of Chemical Research*, Vol.51, No. 8, PP. 1850-1857.
- [۱۰]. کریمیان، شکراله (۱۳۹۶). دورهم-تندگی کوانتومی رویکردی علمی به سوی دورنوردی انسان، مجله-نشاء علم، فصلنامه-علم-سی پژوهش-سی، سال هفتم، شماره دوم، خرداد ماه، ص ۱۲۸-۱۲۲
- [11]. Montagnier, L., Aissa, E., Giudice, D. Lavallee, C., Tedeschi, A., Vitiello, G. (2011). DNA Waves and Water, *J. Phys.: Conf. Ser.*, Vol. 306, 012007.