

# بررسی اقتصادی تولید هیدروژن از زیست توده بروش تفکافت<sup>۱</sup>

معصومه قلبی آهنگری

تهران، پژوهشگاه صنعت نفت، پژوهشکده شیمی و پتروشیمی

پیام نگار: ahangarym@ripi.ir

## چکیده

سوخت‌های زیستی به عنوان جایگزین سوخت‌های فسیلی و سوخت‌های حمل و نقلی از نظر فنی بسیار اهمیت دارند. از آنجا که طی فرایند تفکافت، زیست‌توده مستقیماً به سوخت‌های جامد، مایع و گازی تبدیل می‌گردد، در بین سناریوهای انرژی بسیار مورد توجه قرار گرفته است. فرآورده‌های این فرایند به طور عموم مخلوط پیچیده‌ای از اسیدها، الکل‌ها، آلدهیدها و فنول‌ها می‌باشند. پسماند جامد این فرایند ماده ای زغالی است که می‌تواند جایگزین زغال کک مورد نیاز در صنعت ذوب آهن شود. فرآورده‌های گازی این فرایند آمیزه‌ای از گازهای با ارزش گرمایشی میانه، نزدیک به ۱۵ مگاژول در هر مترمکعب است. بنابراین در این مقاله سعی شده است روش تفکافت، مزایا و معایب این روش و جایگاه آن در جهان مورد بررسی قرار گیرد. بررسی اقتصادی این روش نشان می‌دهد که با توجه به وجود پتانسیل قوی زیست توده در کشورمان با برنامه‌ریزی تکنیکی می‌توان هزینه روش مورد نظر را کاهش داد و در جهت تولید گاز غنی از هیدروژن به بهترین نحو از آن بهره برد. هزینه فرایند تفکافت با این برنامه‌ریزی از (۳/۶۰/Kg H<sub>2</sub> دلار) به (۲/Kg H<sub>2</sub> دلار) تا سال ۲۰۱۵ خواهد رسید.

کلمات کلیدی: تولید هیدروژن، تفکافت زیست توده

## ۱- مقدمه

مصرفی، از طریق زیست توده تأمین می‌گردد. با افزایش تقاضا برای انرژی و کاهش روزافزون منابع طبیعی، تقاضا برای انرژی زیست توده بعنوان جایگزین برای انرژی، رو به افزایش است و در حال کسب موقعیت بهتری در بازار انرژی سوخت‌های آلی می‌باشند [۱]. فرآیندهای مختلفی برای تبدیل زیست توده و ضایعات به انرژی‌های گازی، مایع و جامد وجود دارد، بعلاوه مواد شیمیایی مختلفی نیز با انجام فرایندهای گوناگون می‌توانند از زیست توده تولید شوند. این روش‌ها برای تولید انرژی از زیست توده بی‌شک سبب افزایش بازدهی تولید انرژی از منابع آن می‌گردد. فرایند تولید انرژی از زیست توده عبارتند از: احتراق مستقیم، تفکافت و گاز سنتز [۲].

زیست توده چهارمین منبع انرژی جهان است و حدود ۱۴٪ از نیازهای انرژی جهان را تأمین می‌کند. سوخت حاصل از فناوری‌های تبدیل زیست توده یا به حالت گاز (زیست گاز) و یا مایع (متانول، اتانول و بیودیزل) است که برای تولید الکتریسیته و گرما مورد استفاده قرار می‌گیرد. تخمین زده شده است که اگر تنها ۱۰٪ از زمین‌های کشاورزی جنگل‌ها به تأمین و تهیه زیست‌توده اختصاص یابد، تولید سالانه انرژی حاصل از زیست توده، معادل چهار پنجم مصرف کنونی انرژی در جهان خواهد بود. در جوامع در حال توسعه که حدود سه چهارم جمعیت جهان را شامل می‌شوند، ۳۵٪ از انرژی

۱. تفکافت واژه مصوب فرهنگستان علوم برای کلمه پیرولیز (Pyrolysis) است.

سهم بخش‌های مختلف منابع زیست توده در ایران بشرح زیر می‌باشد [۱]:

- زائدات جامد کشاورزی و جنگلی ۵۹٪

- فضولات دامی (مرغاری‌ها و دامداری‌ها) ۲۸٪

- فسادپذیری شهری (زباله‌ها) ۱۱٪

- فاضلاب‌های شهری و فسادپذیری صنایع ۲٪

از آنجا که فرایند تفکافت، یک فرآیند مهم در به‌دست آوردن انرژی از زیست‌توده محسوب می‌شود و می‌تواند یک فرایند بسیار مهم برای کشورهای در حال توسعه مثل ایران باشد، در بین سناریوهای تولید انرژی بسیار مورد توجه قرار گرفته است. ایران کشوری است که بر روی منحنی شدت انرژی افزایشی قرار دارد. لذا، بایستی با بهره‌گیری از تجارب سایر کشورهای توسعه یافته، به سمت مدیریت پایدار منابع طبیعی حرکت کند. فرآورده‌های این فرایند به طور عموم مخلوط پیچیده‌ای از اسیدها، الکل‌ها، آلدهیدها و فنول‌ها می‌باشند که برای داشتن بازار مصرف می‌بایست به روش‌های مناسب از هم جدا شوند. پسماند جامد این فرایند ماده‌ای، زغالی است که می‌تواند جایگزین زغال کک مورد نیاز در صنعت ذوب آهن شود. فرآورده‌های گازی این فرایند آمیزه‌ای از گازهای با ارزش گرمایشی میانه، نزدیک به ۱۵ مگاژول در هر مترمکعب، است که شامل مونواکسید کربن، هیدروژن، متان و دیگر گازها می‌گردد. سالانه حدود ۶۰۰۰۰۰ تن باگاس در شرکت کشت و صنعت نیشکر هفت تپه سوزانده می‌شود. با استفاده از روش تفکافت می‌توان از هر کیلوگرم زیست توده فوق حدود ۱۲۰-۸۰ گرم هیدروژن تولید کرد و گاز سنتز تولید شده در فرایند مذکور می‌تواند به عنوان خوراک بسیاری از پتروشیمی‌های صنایع شیمیایی مورد استفاده قرار گیرد [۳ و ۴].

قابل ذکر است، اخیراً دفتر زیست توده سازمان انرژی‌های نو، از تولید برق از منابع زیست توده خبر داد که در حال حاضر قرارداد خرید تضمینی برق با دو واحد مشهد و شیراز منعقد شده است که به زودی این پروژه در این دو واحد، اجرایی می‌شود. با توجه به این که این گازها در گذشته سوزانده می‌شدند، قرارداد خرید تضمینی برق با هر دو واحد مشهد و شیراز منعقد شده است تا متعاقب آن هر دو واحد به مدار وارد شوند. برقی که در این دو واحد تولید می‌شود توسط سازمان انرژی‌های نو ایران به قیمت تضمینی

خریداری خواهد شد.

اجرای پروژه‌های تولید برق و حرارت و یا سوخت از منابع زیست توده در روستاها در اقتصاد روستایی موثر خواهد بود. با توجه به اینکه این پروژه‌ها در قالب کوچکتر اجرایی می‌شوند، می‌توانند به عنوان پروژه‌های زودبازده و اشتغال زا نیز مطرح شوند. واضح است که ادامه راه، به توجه سیاستگذاران و سرمایه گذاران بخش‌های خصوصی و دولتی وابسته است که با ایجاد بستری مناسب، زمینه تحولی عظیم در بخش تامین و تضمین انرژی کشور را فراهم آورند.

## ۲- روش تفکافت

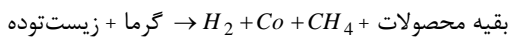
طی فرایند تفکافت، زیست‌توده در غیاب اکسیژن با تجزیه حرارتی مستقیماً به سوخت‌های جامد، مایع و گازی تبدیل می‌گردد. بطور کلی واکنش تفکافت، بدو دسته تفکافت آهسته و سریع تقسیم می‌شود.

تفکافت آهسته روش مناسبی برای تولید هیدروژن نیست، چون محصول اصلی ذغال فعال می‌باشد. اما تفکافت سریع فرایندی در دمای بالا است که زیست توده خام با سرعت در غیاب هوا گرما داده می‌شود، بخار تشکیل شده سریعاً متراکم می‌گردد و به یک (بایو- مایع قهوه‌ای تیره) تبدیل می‌گردد. محصولات حاصل از تفکافت سریع در سه شکل گاز، مایع و جامد ایجاد می‌شود [۵].

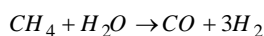
(I) محصولات گازی شامل  $CO_2, CO, CH_4, H_2$  است و بقیه محصولات گازی به نوع زیست توده مورد استفاده بستگی دارد.

(II) محصولات مایع شامل قیر و روغن هستند که در دمای اتاق بحالت مایع وجود دارند، مانند استون، اسید استیک و غیره.

(III) محصولات جامد بطور اصلی عبارتند از ذغال، کربن خالص و مواد بی اثر دیگر گرچه اغلب فرایندهای تفکافت برای تولید (بایو- سوخت) طراحی شده‌اند، اما هیدروژن از تفکافت سریع در شرایط دمای بالا بصورت زیر تولید می‌شود:

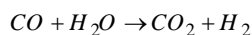


متان و بخارات بقیه هیدروکربنهایی که تولید می‌شوند می‌توانند برای تولید هیدروژن بیشتر وارد عملیات ریفرمینگ<sup>۱</sup> گردند.



جهت افزایش تولید هیدروژن، واکنش تغییر (گاز- آب) می‌تواند بصورت زیر بکار رود.

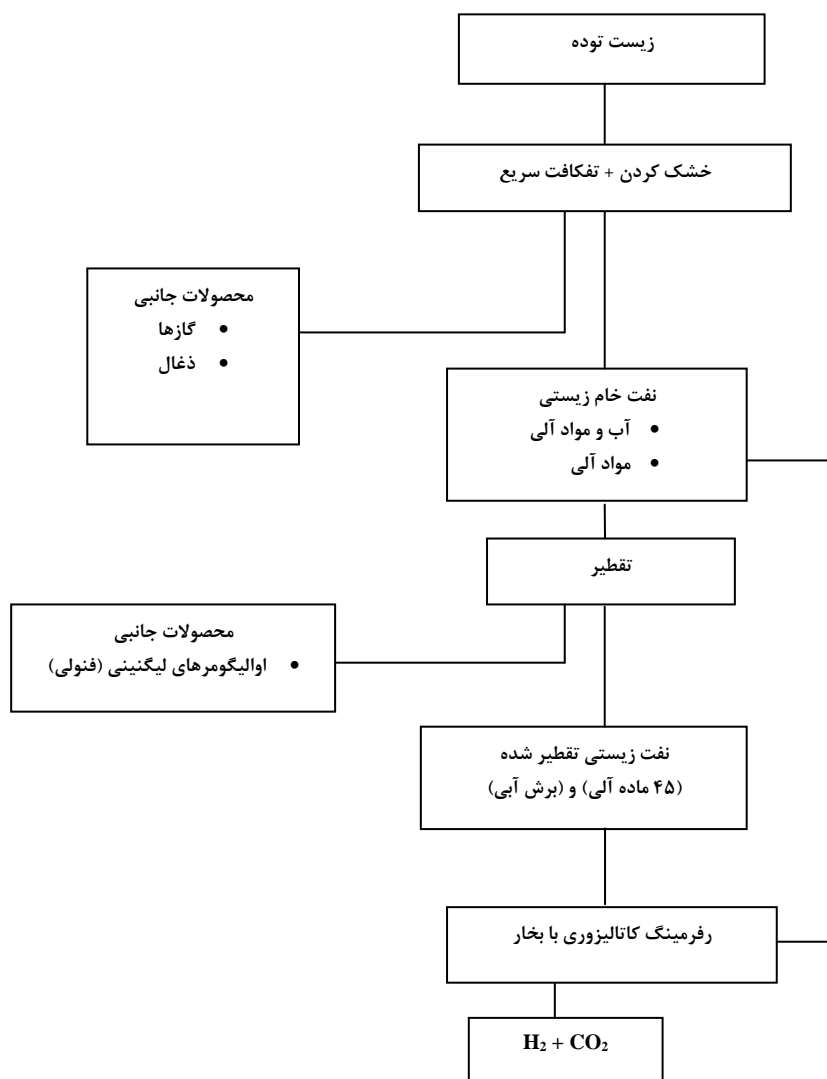
استفاده می‌شود، ماکزیمم محصول تولید هیدروژن به ۹۰٪ می‌رسد. با اضافه کردن فرایند (گاز- آب) و ریفرمینگ، هیدروژن تولید شده می‌تواند بطور قابل توجهی افزایش پیدا کند. دما، سرعت گرم کردن، زمان باقیمانده و نوع کاتالیست از پارامترهای مهم در کنترل فرایند تفکافت هستند. در تولید هیدروژن برای ایجاد محصولات گازی مناسب، دمای بالا، سرعت گرم کردن بالا و زمان باقیمانده فاز فرآر مورد نیاز هستند. این پارامترها می‌توانند بوسیله انتخاب انواع راکتورها و مدلهای انتقال گرمای مختلف همانند (گاز- جامد) و (جامد- جامد) کنترل شوند [۷].



علاوه بر محصولات گازی، تولیدات روغنی هم می‌توانند برای تولید هیدروژن بکار روند. تفکافت روغن می‌تواند بدو جزء بر پایه انحلال پذیری در آب تقسیم شود. جزء قابل حل در آب که می‌تواند برای تولید هیدروژن مورد استفاده قرار گیرد، در حالی که جزء غیر قابل حل در آب برای فرمولاسیون چسب قابل استفاده است.

شکل (۱) دیاگرام فرایند تفکافت زیست توده را نشان می‌دهد [۶]. فرایند تفکافت به مقدار رطوبت خوراک بستگی دارد که معمولاً باید حدود ۱۰٪ باشد.

مطالعات تجربی نشان می‌دهند که وقتی کاتالیست بر پایه نیکل



شکل ۱- دیاگرام فرایند تفکافت زیست توده

جدول ۱- پایلوت‌های موجود تفکافت زیست توده در جهان

عملیات پایلوت	سایز پایلوت	فرایند
خوراک زایدات چوبی است (انتاریو-کانادا)	این واحد حدود ۱۰۰ تن زیست توده را در روز تبدیل می‌کند	بایوترم (TM)
کار با فرایند متفاوت برای تولید آروماتهای بر پایه بایوبی (اتاوا- کانادا)	این واحد حدود ۷۰ تن زیست توده را در روز تبدیل می‌کند	فرایند حرارتی سریع RTP (TM)
خوراک باقیمانده روغن خرما است (مالزی)	ظرفیت واحد ۵۰ تن در روز	گروه تکنولوژی زیست توده (BTG)
خوراک واحد کاه است (آلمان)	ظرفیت واحد ۱۲ تن در روز	فرایند بایولیک مرکز تحقیقات کالسرروه (FZK)
خوراک باقیمانده چوب در چوب بری است (آلمان)	ظرفیت واحد ۶ تن در روز	فرایند BTO کمپانی PYTEC

### ۲-۳ هزینه تولید هیدروژن بروش تفکافت

از آنجایی که هیدروژن بطور طبیعی وجود ندارد، نیاز است که از روش‌های ارزانیقیمت، برای تولید آن استفاده شود. از بین روش‌های موجود، روش تبدیل بخار آب بوسیله متان<sup>۱</sup>، ارزانترین روش برای تولید هیدروژن می‌باشد که تقریباً نیمی از تولیدات هیدروژن در دنیا به این روش صورت می‌گیرد که خوراک آن گاز طبیعی است. البته باید توجه داشت که هزینه حذف گاز CO<sub>2</sub> ایجاد شده، در حدود ۳۰-۲۵٪ به هزینه تمام شده فرایند اضافه می‌کند.

در فرایند تبدیل گرما شیمیایی مستقیم (پیرولیز یا گازی سازی)، روش‌های تکنو اقتصادی مشخص می‌کنند که این فرایندها برای اینکه اقتصادی باشند، باید در مقیاس بزرگ تعریف شوند که شامل در نظر گرفتن سرمایه گذاری در تولید خوراک و ساختار زیربنایی فرایند است. همانطور که قبلاً اشاره شد در فرایند ترموشیمیایی غیر مستقیم، زیست توده به سوخت زیستی (بایو گاز، بایودیزل و بایواتانول) تبدیل می‌شود که بدنبال آن با فرایند ریفرمینگ به هیدروژن تبدیل می‌شود. مزیت این روش، تولید سوخته‌های زیستی

بعضی از نمک‌های معدنی همانند، کلریدها، کربنات‌ها و کرومات‌ها تاثیر خوبی روی سرعت واکنش تفکافت ایجاد می‌کنند. هر چند گازی کردن قیر مشکل است. اما مطالعات گسترده‌ای روی اثر کاتالیست دولومیت ارزان قیمت و CaO بر روی تجزیه ترکیبات هیدروکربن در قیر انجام شده است [۸و۹]. اثرات کاتالیزگری بقیه کاتالیست‌ها مانند کاتالیست پایه نیکل [۱۰]، زئولیت نوع Y [۱۰]،  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ،  $\text{K}_2\text{CO}_3$  و  $\text{CaCO}_3$  [۱۲] و اکسیدهای فلزی مختلف ( $\text{TiO}_2$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZrO}_2$ ) مطالعه شده‌اند. در میان انواع اکسیدهای فلزی مختلف،  $\text{Al}_2\text{O}_3$  و  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  اثرات کاتالیستی بهتری نسبت به بقیه دارند. در میان کاتالیست‌ها،  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  بهتر از  $\text{K}_2\text{CO}_3$  و  $\text{CaCO}_3$  است. البته فلزات نوبل Ru و Rh نسبت به کاتالیست Ni اثر بهتری دارند و کمتر مستعد تشکیل کربن هستند، که البته به خاطر قیمت بالا از آنها استفاده نمی‌شود [۱۳].

جهت ارزیابی تولید هیدروژن در تفکافت انواع مختلف زیست توده، تحقیقات آزمایشگاهی گسترده‌ای در سالهای اخیر انجام شده است. از آنجایی که رسوب کک و ذغال روی سطح کاتالیست سبب کاهش بازدهی عملکرد آن می‌شود، معمولاً از بستر کاتالیست سیال برای افزایش بازدهی تولید هیدروژن استفاده می‌شود.

### ۳- بررسی اقتصادی تفکافت زیست توده برای تولید هیدروژن

#### ۱-۳ بازاریابی

یکی از موانع موجود در استفاده از زیست توده، مشکل حمل و نقل مقادیر زیاد زیست توده برای تولید مقدار کم هیدروژن می‌باشد. زیست توده محتوی تنها ۶/۵٪ وزنی هیدروژن است. اگر زیست توده تحت عمل تولید مایع بایوبی قرار گیرد می‌تواند موانع موجود بر سر راه حمل و نقل را تا حدی کاهش دهد. زیرا مایع بدلیل چگالی انرژی بالاتر برای حمل و نقل راحت‌تر است. ملاحظات اقتصادی و تکنیک‌های جانبی در تهیه خوراک زیست توده، تحقیقات در افزودنی‌های کاتالیستی و غیر کاتالیستی و پارامترهای طراحی راکتور برای بهبود گزینش پذیری و به حداقل رساندن مقدار CO تولید شده، مؤثرند. البته برای بالا بردن خلوص تولید هیدروژن نیاز به روش‌های موثرتری است. جدول (۱)، پایلوت‌های موجود تفکافت زیست توده در جهان را معرفی می‌کند [۱۴].

1. Steam Methan Reformer (SMR)

### ۳-۳ آینده روش تفکافت زیست توده

تولید هیدروژن از زیست توده یک فرایند گران قیمت است که تقریباً (۰/۴-۰/۲)٪ از کل انرژی خورشید با قیمت حدود (۷/۰۵/kgH<sub>2</sub> دلار) در فرایند تفکافت در یک پایلوت با اندازه متوسط، به هیدروژن تبدیل می‌شود [۱۷].

در فرایند تفکافت قیمت برآورد شده به نوع خوراک فرایند، توزیع آن و هزینه های سرمایه گذاری شده آن نسبت به بقیه روشهای تولید بستگی دارد.

کمیته بررسی اقتصادی، هزینه های جانبی و مضرات زیست محیطی فرایند تولید را که می‌تواند همراه با تولید، برداشت و انتقال زیست توده باشد صرف نظر می‌کند.

در تکنولوژی های آینده، بازدهی فرایند تولید هیدروژن از زیست توده تا ۴۰٪ در مقابل ۲۶٪ کنونی افزایش می‌یابد. تخمین زده شده است که مقدار زیست توده ای که برای حالت ایده ال بازدهی، مورد نیاز است به  $282000 \text{ (mi)}^2$  از زمین کشاورزی نیاز دارد. که این مسئله می‌تواند مضرات محیطی را در خاک، منابع آب، گوناگونی زیستی و همچنین قیمت محصولات کشاورزی بوجود آورد. این کمیته تحقیقی تخمین می‌زند که برآورد قیمت تکنولوژی آینده تولید هیدروژن از زیست توده (۳/۶۰/kg H<sub>2</sub>) باشد که نسبت به بقیه فناوری‌های تولید، غیر قابل مقایسه است.

### ۴- بحث و نتیجه‌گیری

در فناوری حاضر، هزینه تولید هیدروژن از تفکافت زیست توده، (۲/۴۴/(kg) H<sub>2</sub>) است، در حالی که هزینه تولید به روش گازی سازی ذغال، حدود (۰/۴۶/kg H<sub>2</sub>) می‌باشد. لذا در نظر است اصلاحاتی در فناوری تفکافت خوراک زیست توده انجام شود. این هزینه، جهت اصلاحات دو برابر هزینه گازی سازی ذغال می‌باشد و بازدهی آن هم پایین تر است. به غیر از هزینه لازم جهت اصلاحات، هزینه خوراک و هزینه توزیع هم باید در نظر گرفته شود که از هزینه های مهم فرایند تفکافت زیست توده می‌باشند.

از مشکلات دیگر روش تفکافت زیست توده، چگالی کم خوراک است که سبب محدود شدن اندازه پایلوت می‌شود که نتیجتاً افزایش در مقیاس پایلوت صرف هزینه زیادی را به همراه خواهد داشت. بنابراین نیاز به برنامه ریزی تکنیکی برای کاهش هزینه تفکافت

به عنوان یک محصول واسطه است که بدلیل داشتن چگالی انرژی بالاتر نسبت به خوراک زیست توده، راحتتر انتقال داده می‌شود. مزیت دیگر این تکنیک، کاربرد آن در مقیاسهای کوچکتر است.

برآورد هزینه فرایند تولید هیدروژن از تفکافت زیست توده شدیداً به هزینه خوراک آن بستگی دارد که حدوداً ۶۲-۳۶٪ از هزینه سوخت نهایی را در برمی‌گیرد.

علاوه براین، این فرایند وابستگی شدیدی به میزان رطوبت خوراک و سایز ذرات آن دارد، که رطوبت حدود ۱۰٪ و اندازه ذرات کوچک مناسب‌ترند.

گرم کردن خوراک در دمای بالا، کنترل دمای واکنش در فاز بخار، کمترین زمان برای باقی ماندن بخارات حاصل درراکتور و خنک کردن سریع آنها از نکات مهم فرایند تفکافت می‌باشد.

محصول ایجاد شده از فرایند تفکافت مایعی به رنگ قهوه‌ای تیره است که بعلت دارا بودن چگالی بالا، سبب کاهش هزینه ذخیره و انتقال می‌شود که آنرا برای استفاده مستقیم در موتورهای احتراقی مناسب می‌سازد. فرایند مذکور بعلت داشتن محصولات جانبی مفید از لحاظ اقتصادی ارزشمند است و خوراک مورد نظر می‌تواند بدون قرار گرفتن تحت واکنشهای جانبی، مستقیماً" برای تولید هیدروژن استفاده شود [۱۵].

در حال حاضر روش تفکافت زیست توده از لحاظ اقتصادی قابل مقایسه با فرایند گازی سازی ذغال نیست و تنها در مناطقی که دسترسی به منابع گاز طبیعی و یا ذغال وجود ندارد، کاربرد دارد. اما گاهی اوقات محصولات جانبی این فرایند (مانند متانول) که در صنایع شیمیایی قابل عرضه می‌باشد قابلیت رقابت دارد. در جدول (۲) برآورد هزینه تولید هیدروژن از فرایند تفکافت که شامل مراحل خالص سازی است، آورده شده است [۱۶].

جدول ۲- برآورد هزینه تولید هیدروژن از فرایندهای تفکافت

فرایند	(\$ / MMBtu)	بازدهی <sup>۱</sup>	(\$ / kg)
تفکافت	۲/۱۹-۱۶/۳	۵۶٪	۱/۲۶-۲/۱۹

۱- مبتنی بر یافته‌های آزمایشگاهی و قابل استفاده در فرایندهای با مقیاس بزرگ نیست.

۲- محاسبه شده بر اساس HHV.

- [8] Bridgwater, A. V., Journal of Analytical and Applied Pyrolysis" 51 (1999).
- [9] Kreutz, T. G., Williams, R. H., Socolow, R. H., Chieso, P., Loza, G., "Production of Hydrogen and Electricity from Coal with CO<sub>2</sub> Capture", Princeton Environmental Institute.
- [10] Milne, T. A., Elam, C. C., Evans, R. J." Hydrogen from Biomass": State of the Art and Research Challenges. NREL IEA/H2/TR-02/001.
- [11] Williams, P. T., Brindle, A. J., "Catalytic pyrolysis of tyres: influence of catalyst temperature", Fuel 81 (2002).
- [12] Chen, G., Andries, J., Spliethoff, H., "Catalytic pyrolysis of biomass for hydrogen rich fuel gas production", Energy Conversion and Management 44,2289 (2003).
- [13] Demirbas, A., " Hydrogen production from carbonaceous solid wastes by steam eforming". Energy Sources Part A,30:924, (2008).
- [14] "Production of Hydrogen from biomass by Catalytic steam reforming of fast pyrolysis oil".Energy & Fuels,12,19-24, (2011).
- [15] Babu, Suresh P., Ph.D. "Biomass Gasification for Hydrogen Production-Process Description and Research Needs". Gas Technology Institute, 1700 South Mount Prospect Road, Des Plaines, IL60018-1804, U.S. A, (2002).
- [16] Hamelinck, C. N., Faaij, A. P. C., "Future prospects for production of methanol and hydrogen from biomass", J Power Sources, 111:1, (2002).
- [17] Sarkar, S., Kumar, A., " A review of techno-economics of biohydrogen production technologies". ASABE annual international meeting, Minneapolis, Minnesota; June 17–20, (2007).
- زیست توده است. هدف شامل کاهش هزینه خوراک زیست توده، عملیات گازی سازی و خالص سازی گاز هیدروژن است. لذا هزینه فرایند تفکافت با این برنامه ریزی از (۳/۶۰/kg H<sub>2</sub> دلار) به (۲/kg H<sub>2</sub> دلار) تا سال ۲۰۱۵ خواهد رسید.

## مراجع

- [1] [http://www.areo.ir/\\_esao/Documents/biomass.pdf](http://www.areo.ir/_esao/Documents/biomass.pdf)
- [2] Karapınar Kapdan, I., Kargi, F., "Bio-hydrogen production from waste materials", 38-569, Enzyme Microb Technol (2006).
- [3] Tavasoli, A., Ahangari, M. G., Soni, C., Dalai, A. K.; "Production of hydrogen and syngas via gasification of the corn and wheat dry distiller grains (DDGS) in a fixed-bed micro reactor", Fuel Processing Technology, 472–482(2009).
- [4] Shoja, M., Babatabar, A., Tavasoli, A., Ataei, A., "Production of hydrogen and syngas via pyrolysis of bagasse in a dual bed reactor" Journal of Natural Gas Chemistry, (2012).
- [5] Ni, M., Leung, D. Y. C., Leung, M. K. H., Sumathy, K., "An overview of hydrogen production from biomass", Fuel Processing Technology, 461-472, May (2006).
- [6] Kathleen McHugh. "Hydrogen Production Methods". MPR Associates, Inc, (2005).
- [7] Jalan, R. K., Srivastava, V. K., "Studies on pyrolysis of a single biomass cylindrical pellet-kinetic and heat transfer effects", Energy Conversion and Management 40 (1999).