



## تجزیه و تحلیل اقتصادی طرح به کارگیری میکروتوربین در کاربردهای سایش پیک و CHP

جواد ساده، محمد فرشاد، حبیب رجبی مشهدی و مجتبی روحانی

گروه برق و کامپیوتر، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

E-mail: sadeh@um.ac.ir

چکیده - با توجه به گسترش زیرساخت‌های شبکه توزیع گاز در کشور و دسترسی نسبتاً آسان به این نوع سوخت، یافتن پتانسیل‌های موجود در به کارگیری این نوع سوخت در تولید انرژی الکتریکی و کاربرد آن در صنعت برق از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. با توجه به پیشرفت تکنولوژی تولیدات پراکنده با سوخت گاز، بهره‌گیری از آنها می‌تواند در استفاده شایسته از گاز طبیعی در صنعت برق مفید بوده و مزایای فراوانی را به همراه داشته باشد. در بین انواع تولیدات پراکنده با سوخت گاز، میکروتوربین یکی از تکنولوژی‌های نسبتاً جدید است که به دلیل ویژگی‌ها و مزایای خاص آن، در حال فراگیر شدن در دنیا می‌باشد و همواره فناوری اعمال شده در ساخت آن در حال پیشرفت و بهبود است. در این مقاله روش ارزیابی اقتصادی طرح به کارگیری میکروتوربین در کاربرد سایش پیک و همچنین در کاربرد تولید توان و گرما (CHP) بیان خواهد شد. در ادامه مشخصات یک میکروتوربین و سیستم نمونه ارائه شده و ارزیابی‌های اقتصادی در راستای دست‌یابی به استراتژی‌های مناسب به کارگیری میکروتوربین جهت سایش پیک در سیستم نمونه انجام خواهد شد. بررسی تاثیر اقتصادی اعمال پروسه CHP در کاربرد میکروتوربین از دیگر اهداف این مقاله محسوب می‌شود.

کلید واژه- تولید پراکنده، تولید توان و گرما، سایش پیک، میکروتوربین.

### ۱- مقدمه

- ✓ مطابق با آخرین تکنولوژی‌ها، واحدهایی با راندمان بالا و رنج ظرفیتی چند کیلووات تا چندین مگاوات عرضه شده‌اند.
  - ✓ معمولاً ابعاد محل مورد نیاز جهت نصب واحدهای تولید پراکنده کوچک می‌باشد و یافتن محل نصب برای ژنراتورهای کوچک بسیار آسان‌تر است.
  - ✓ گاز طبیعی که تقریباً در اکثر مناطق توزیع شده است و قیمت نسبتاً پایداری دارد، به عنوان سوخت اغلب واحدهای تولید پراکنده مورد استفاده قرار می‌گیرد.
  - ✓ اغلب تولیدات پراکنده به زمان نصب و رامانداری کوتاهی نیاز دارند و معمولاً می‌توان آنها را از مکانی به مکان دیگر منتقل نمود. همچنین ریسک سرمایه‌گذاری نیز چندان بالا نیست.
  - ✓ تولیدات پراکنده دارای راندمان مناسب و خوبی
- تولیدات پراکنده در سال‌های اخیر به سرعت توسعه یافته‌اند و همواره از لحاظ تکنولوژی و تکنیک در حال پیشرفت می‌باشند. میل به استخراج شکل‌های مختلف انرژی در راستای تضمین صرفه جویی انرژی کل، باعث توسعه کمی و کیفی تولیدات پراکنده گشته است. همچنین در برخی کشورها، کمک‌های مالی دولت نیز در جهت تشویق و توسعه تولید پراکنده مد نظر قرار می‌گیرد. پیش‌بینی می‌گردد که تا سال ۲۰۱۰، درصد قابل توجهی از طرفیت تولید جدید را تولیدات پراکنده تشکیل دهنده. [۲-۱] در اینجا برخی از دلایل گسترش استفاده از تولیدات پراکنده بصورت خلاصه آورده شده است: [۳-۹]
- ✓ واحدهای تولید پراکنده به مصرف کننده نزدیک‌تر می‌باشند، لذا هزینه انتقال و توزیع به طرز قابل توجهی کاهش می‌یابد.

مدیریت بار بهره جست.

✓ زمان متوسط خروج واحدهای تولید پراکنده معمولاً بسیار کم است که این امر در کارخانه ها و صنایعی که دارای پروسه مداومی می باشند و یا قطع برق خسارات بسیاری به صنعت موردنظر وارد می سازد، دارای اهمیت فراوانی است. برای مثال زمان متوسط خروج برای یک واحد تولید پراکنده ممکن است در حدود ۳۰ ثانیه در سال باشد.

✓ در بسیاری از کشورهای در حال توسعه، محلهای مسکونی و تجاری فراوانی وجود دارند که در مکانی دورتر از شبکه بهم پیوسته قرار داشته و به انرژی الکتریکی دسترسی ندارند. تولید پراکنده فرصتی برای افزایش کیفیت زندگی در این محلهای در اختیار می گذارد.

گاز طبیعی، به علت گسترش شبکه های توزیع گاز در اکثر نقاط دنیا و دسترسی نسبتاً آسان به این نوع سوخت و با توجه به قیمت نسبتاً پایدار، صرفه اقتصادی و میزان آلودگی محیطی پایین آن، سوخت رایج اکثر تولیدات پراکنده محسوب می گردد. با توجه به دسترسی به این نوع سوخت و گسترش زیرساخت های شبکه توزیع گاز در کشور، یافتن پتانسیل های موجود در به کارگیری این نوع سوخت در تولید انرژی الکتریکی و کاربرد آن در صنعت برق از اهمیت ویژه ای برخوردار می باشد. انواع تکنولوژی های تولیدات پراکنده با سوخت گاز می توانند در استفاده شایسته از این نوع سوخت در صنعت برق مفید باشند. ضمن آنکه تکنولوژی تولیدات پراکنده با سوخت گاز در سال های اخیر پیشرفت قابل توجهی داشته اند و بهره گیری از آنها می تواند مزایای فراوانی را به همراه داشته باشد.

در بین انواع تولیدات پراکنده با سوخت گاز، میکروتوربین تکنولوژی نسبتاً جدیدی است که به دلیل ویژگی ها و مزایای خاص آن، در حال فرا گیر شدن در دنیا می باشد و همواره فناوری اعمال شده در ساخت آن در حال پیشرفت و بهبود است. میکروتوربین قابلیت استفاده از رنج وسیعی از سوخت ها را دارد، ولی آنچه در اکثر موارد به عنوان سوخت این نوع تولید پراکنده مورد استفاده قرار می گیرد،

هستند، به ویژه در تولیدهای توام و سیکل های ترکیبی (در ژنراتورهای نسبتاً بزرگتر)، قابلیت اعمال پروسه تولید توام توان و گرما (CHP) می تواند باعث افزایش راندمان تولیدات پراکنده (راندمان توام انرژی الکتریکی و گرما) تا بیشتر از ۹۰ درصد گردد. اعمال پروسه CHP یک افزایش بسیار کوچک در هزینه سرمایه گذاری (کمتر از ۵ درصد در کاربردهای صنعتی) را به همراه خواهد داشت.

✓ هزینه انتقال و توزیع افزایش یافته است، در حالی که هزینه های تولید پراکنده همواره در حال کاهش می باشند.

✓ تولیدات پراکنده استرس و فشار را در شبکه های انتقال و توزیع کاهش می دهند.

✓ تکنولوژی های جدید تولید پراکنده معمولاً از لحاظ زیست محیطی بسیار تمیز بوده و آلودگی صوتی کمی نیز ایجاد می کنند.

✓ تولیدات پراکنده انتخاب های فراوانی از ترکیبات هزینه و قابلیت اطمینان را در اختیار تولید کننده و مصرف کننده قرار می دهند. تکنولوژی های جدید تولید پراکنده این قابلیت را دارند که با چندین نوع سوخت کار کنند، که این امر باعث ایجاد انعطاف و کاهش هزینه خواهد شد. سوخت های مورد استفاده در جاهای مختلف ممکن است متفاوت باشند، مثلاً در آمریکا گاز طبیعی به عنوان سوخت تولیدات پراکنده ترجیح داده می شود.

✓ می توان از تولیدات پراکنده در هنگام وقوع یک خروج غیرمنتظره در سیستم بهره جست و قابلیت اطمینان تولید را افزایش داد. در واقع می توان از تولیدات پراکنده جهت تامین سرویس های جانبی استفاده نمود. برخی تولیدات پراکنده دارای زمان استارت و خاموش شدن کمی هستند و می توان از آنها برای تامین سرویس های جانبی از قبیل انواع رزو و همچنین جهت مدیریت تراکم خطوط انتقال و یا در برنامه های

توربین و ژنراتور را تحمل می‌کند. این شافت به جای سوار شدن بر روی یاتاقان روغن کاری شده که در اکثر توربین‌های احتراقی مورد استفاده قرار می‌گیرد، بر روی یاتاقان هوایی سوار شده است. این امر باعث کاهش هزینه تعمیرات و پیچیدگی فنی می‌گردد. البته میکروتوربین‌ها بطور کلی شامل دو نوع تک شافتی و دو شافتی می‌باشند. در مدل تک شافتی، یک توربین کمپرسور و ژنراتور را می‌چرخاند، ولی در مدل دو شافتی، یک توربین جهت چرخاندن کمپرسور استفاده می‌شود و توربین دوم جهت گرداندن ژنراتور مورد استفاده قرار می‌گیرد. در مدل‌های دو شافتی، توربین گرداننده کمپرسور بر روی یک شافت و توربین گرداننده ژنراتور بر روی شافت دیگر واقع شده است. در مدل‌های دو شافتی می‌توان با استفاده از یک توربین جداگانه برای ژنراتور و استفاده از جعبه دندن و به کار بردن ژنراتورهای سنکرون معمولی (مثلًا با سرعت ۵۰۰۰ دور بر دقیقه) فرکانس مناسب برای مصرف کننده را مستقیماً تولید نمود. در این نوع میکروتوربین‌ها فشارها کمتر و عمر ماشین طولانی تر خواهد بود. البته معمولاً هزینه این نوع میکروتوربین‌ها بیشتر از نوع تک شافتی می‌باشد. مدل‌های تک شافتی معمولاً برای بهره‌برداری در سرعت چرخش بسیار بالا (در برخی مدل‌ها بیش از ۱۰۰۰۰ دور بر دقیقه) طراحی می‌گردند و جریان متسابق تولید شده توسط ژنراتور آنها دارای فرکانس بسیار بالایی می‌باشد. در ژنراتورهای سرعت بالای مدل‌های تک شافتی، معمولاً یک ماده مغناطیس دائم (عموماً Samarium-Cobalt) به کار می‌رود و لازم است که خروجی فرکانس بالای آن (در رنج ۱۰۰۰ تا ۳۰۰۰ هرتز) به فرکانس مطلوب (۵۰ یا ۶۰ هرتز) تبدیل شود. این امر نیاز به بخش شایسته ساز توان در این نوع میکروتوربین‌ها از نوع تک شافتی به ذکر است که اکثر میکروتوربین‌ها از نوع تک شافتی می‌باشند و ژنراتورهای فرکانس بالا که تکنولوژی جدیدتری هستند، مورد استفاده قرار می‌گیرند. [۱۰] [۱۴]

قابلیت انعطاف و کنترلی که الکترونیک قدرت به کار رفته در میکروتوربین در اختیار آن قرار می‌دهد، باعث شده است که این نوع تولید پراکنده در حالت‌های مختلف بهره‌برداری عملکرد بهتری نسبت به برخی دیگر از انواع تولید پراکنده داشته باشد. قابلیت کار با سوخت گاز، آلودگی محیطی NOx پایین، آلودگی صوتی کم، ابعاد کوچک، وزن کم،

گاز طبیعی می‌باشد. گاز طبیعی در سیستم احتراقی میکروتوربین عملکرد مناسبی دارد.

در این مقاله دو پتانسیل کاربردی میکروتوربین شامل سایش پیک و اعمال پروسه CHP مورد مطالعه و بررسی اقتصادی قرار خواهد گرفت. در این راستا روش ارزیابی اقتصادی طرح به کارگیری میکروتوربین در این دو کاربرد بیان خواهد شد. در ادامه مشخصات یک میکروتوربین و سیستم نمونه ارائه شده و ارزیابی‌های اقتصادی در راستای دست‌یابی به استراتژی‌های مناسب به کارگیری میکروتوربین جهت سایش پیک در سیستم نمونه انجام خواهد شد. همچنین تأثیر اقتصادی اعمال پروسه CHP در کاربرد میکروتوربین نمونه مورد مطالعه قرار خواهد گرفت.

## ۲- تکنولوژی میکروتوربین

میکروتوربین‌ها توربین‌های گازی کوچکی هستند که سوخت‌های مایع و گازی را می‌سوزانند تا یک جریان گاز پر انرژی را جهت چرخاندن ژنراتور الکتریکی تولید نمایند. [۱۰]

میکروتوربین‌ها معمولاً دارای یک بخش بهبودساز می‌باشند. این بخش بهبودساز باعث افزایش راندمان این نوع تولید پراکنده می‌گردد. [۱۱]. در میکروتوربین‌های معمولی هوا ورودی در یک کمپرسور شعاعی (گریز از مرکز) فشرده می‌شود، سپس این هوا فشرده شده در بخش بهبودساز با استفاده از گرمای گاز خروجی توربین کمی گرم می‌شود. هوا گرم شده در بخش بهبودساز به محفظه احتراق می‌رود و در آنجا با سوخت مخلوط شده و این مخلوط سوزاننده می‌شود. در واقع در محفظه احتراق، هوا با گاز (سوخت) مخلوط می‌شود و احتراق این مخلوط باعث ایجاد گاز گرمی می‌گردد، که این گاز گرم از دهانه توربین و چرخ‌های توربین می‌گذرد، و انرژی حرارتی گاز گرم را به انرژی مکانیکی چرخشی توربین تبدیل می‌کند. توربین، کمپرسور و ژنراتور را می‌چرخاند و انرژی مکانیکی در ژنراتور به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود. [۱۲-۱۳]

میکروتوربین‌ها سیستم‌های نسبتاً ساده‌ای هستند، که معمولاً تنها دارای یک جزء متحرک می‌باشند. این جزء متحرک یک شافت سرعت بالا است که کمپرسور، چرخ

شبکه سراسری دسترسی دارد، تنها در زمان پیک بار و قیمت بالای انرژی الکتریکی اقتصادی است. بسیاری از تولیدات پراکنده در دنیا تنها در موقع پیک بار به عنوان جایگزین توان شبکه مورد استفاده قرار می‌گیرند و مصرف کنندگان بقیه نیازهای مصرفی خود را در زمانهای غیر پیک از شبکه تامین می‌کنند. البته این در زمانی است که بهره‌گیری از مزایای دیگر تولیدات پراکنده مد نظر نباشد و هدف تنها تامین یک بار معمولی در محل باشد.

### ۳-۱- محاسبه هزینه تولید انرژی الکتریکی میکروتوربین در کاربرد سایش پیک

در کاربرد سایش پیک یکی از فاکتورهای اساسی و تاثیرگذار بر هزینه تولید انرژی الکتریکی میکروتوربین‌ها ساعت‌بهره‌برداری در سال آنها است.

هزینه انرژی الکتریکی تولیدی توسط میکروتوربین‌ها را می‌توان بر حسب رابطه زیر محاسبه کرد:

$$COE = \frac{C_I}{h} (A|P, n, i) + C_{O\&M} + C_F \quad (1)$$

$C_OE$ : هزینه برق تولیدی میکروتوربین (\$/kWh)

$C_I$ : هزینه نصب و سرمایه‌گذاری میکروتوربین (\$/kW)

$C_{O\&M}$ : هزینه تعمیرات و بهره‌برداری (\$/kWh)

$C_F$ : هزینه سوخت به ازای هر کیلووات ساعت (\$/kWh)

$i$ : ساعت متعادل بهره‌برداری بار کامل در سال (hours)

$A|P, n, i$ : فاکتور بازیافت سرمایه برای مدت بازگشت سرمایه  $n$  سال و در نرخ بهره  $i$

لازم به ذکر است که  $\Delta$  نرخ بهره واقعی می‌باشد و بر اساس نرخ بهره بانکی و نرخ تورم محاسبه می‌گردد. هزینه تعمیرات و بهره‌برداری ممکن است بر اساس قرارداد سالانه تعیین شود. در اینصورت هزینه تعمیرات و بهره‌برداری ( $CO\&M$ ) را می‌توان بر اساس رابطه زیر محاسبه نمود:

$$C_{O\&M} = \frac{C_{O\&M}^{Annual}}{h} \quad (2)$$

$C_{O\&M}^{Annual}$ : هزینه سالیانه تعمیرات و بهره‌برداری (\$/kW)

در واقع  $CO\&M$  یک مقدار متوسطی از هزینه تعمیرات و

قابلیت انعطاف و کنترلی بالا، تعداد کم بخش‌های متحرک، هزینه نسبتاً پایین تعمیر و نگهداری و فاصله زمانی طولانی بین دو تعمیر متوالی، از مواردی به شمار می‌روند که برو جذابیت‌های این نوع تولید پراکنده افزوده و باعث گسترش استفاده از آن در سطح دنیا گشته‌اند. یکی دیگر از مزایای میکروتوربین‌ها، گرمای خروجی قابل توجه آنهاست که می‌تواند برای تولید گرما در محل، بصورت توازن‌بین انرژی الکتریکی، مورد استفاده قرار گیرد. علاوه بر این، برنامه‌های تحقیقاتی جهت کاهش هزینه بهره‌برداری، افزایش فاصله زمانی بین دو تعمیر متوالی، افزایش راندمان و بهبود عملکردی میکروتوربین‌ها، در حال پیگیری و اجرا است، که انتظار می‌رود با پیشرفت تکنولوژی ساخت و اعمال فن‌آوری‌های جدید در این نوع تولید پراکنده، استفاده از آن در اکثر نقاط دنیا فraigیر شود [۱۵-۱۶].

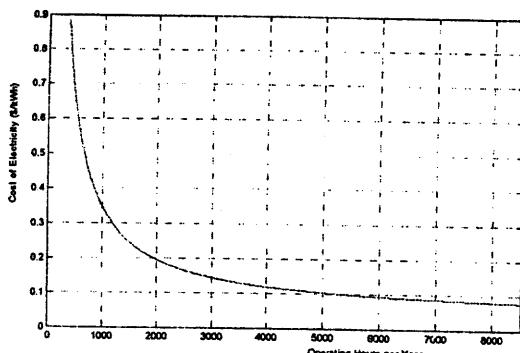
پتانسیل کاربردی میکروتوربین‌ها در قالب تولید تنهای توان می‌تواند شامل سایش پیک، تولید توان مرغوب، تولید توان دوردست و پشتیبان شبکه باشد. در کاربردهای تولید توان و گرما (CHP)، گرمای گاز خروجی میکروتوربین جهت تولید آب گرم برای مصارف خانگی، گرم نمودن فضای ساختمان، چرخاندن چیلرهای جذبی، خشک کردن چوب در صنایع محصولات چوبی و یا تولید دیگر انواع انرژی حرارتی موردنیاز در ساختمان‌ها و صنایع به کار گرفته می‌شود. [۱۰]

### ۳- کاربرد سایش پیک

در برخی مناطق، مصرف کنندگان و شرکت‌های برق جهت کاهش هزینه توان در پیک بار از تولید محلی استفاده می‌کنند. سایش پیک برای مصرف کنندگانی که دارای ضریب بار نامناسبی می‌باشند، سودمند است.

میکروتوربین‌ها در بهره‌برداری، اندازه و نوع سوخت دارای قابلیت انعطاف مناسبی می‌باشند. یک میکروتوربین می‌تواند به نوسانات و تغییرات قیمت سوخت و انرژی الکتریکی شبکه پاسخ مناسبی داده و با توجه به این نوسانات بهره‌برداری گردد. به بیان دیگر، توانایی تولید در محل مصرف امکان کنترل و پاسخ دهنده به تغییرات قیمت انرژی الکتریکی را به مصرف کننده می‌دهد. شاید بتوان گفت که استفاده از میکروتوربین‌ها در حالتی که محل مصرف به

قیمت انرژی الکتریکی تولیدی میکروتوربین در میزان ساعت بهره‌برداری سالانه مختلف را می‌توان به کمک روابط (۱) تا (۳) محاسبه نمود. نمودار شکل (۱) تغییرات هزینه انرژی الکتریکی تحويلی توسط میکروتوربین بر حسب میزان ساعت بهره‌برداری سالانه را نمایش می‌دهد. لازم به ذکر است که در تمامی محاسبات مدت بازگشت سرمایه مورد نظر در نصب میکروتوربین برابر عمر تقریبی میکروتوربین (۱۰ سال) فرض شده است.



شکل ۱: تغییرات قیمت انرژی الکتریکی یک میکروتوربین نمونه بر حسب میزان ساعت بهره‌برداری سالانه

همانطور که در شکل (۱) مشاهده می‌گردد، انرژی الکتریکی میکروتوربین برای میزان بهره‌برداری ۳۶۵ ساعت در سال (به طور متوسط ۱ ساعت در روز) بسیار گران قیمت است (۰/۸۹ دلار بر کیلووات ساعت). با میزان بهره‌برداری متوسط ۲ ساعت در روز هزینه انرژی الکتریکی میکروتوربین تقریباً به نصف حالت ۱ ساعت در روز کاهش می‌یابد (۰/۴۶ دلار بر کیلووات ساعت). ولی با افزایش میزان ساعت بهره‌برداری در سال، مقدار کاهش هزینه انرژی الکتریکی کمتر می‌گردد. نمودار شکل (۲) تغییرات هزینه انرژی الکتریکی تحويلی توسط میکروتوربین بر حسب میزان ساعت بهره‌برداری سالانه را در هزینه‌های خرید مختلف نشان می‌دهد. در نمودار شکل (۲)، CP نشان‌دهنده هزینه خرید میکروتوربین و تجهیزات می‌باشد. هزینه خرید از ( $\$/kW$ ) ۲۰۰ تا (۱۲۰۰) ( $\$/kW$ ) با پله‌های ۲۰۰ تابی افزایش یافته است. در این نمودار هزینه‌های دیگر از قبیل هزینه نصب، هزینه تعمیرات و هزینه سوت خست ثابت فرض شده اند.

بهره‌برداری میکروتوربین به ازای هر کیلووات ساعت انرژی تولیدی آن است.

هزینه سوت خست میکروتوربین به ازای هر کیلووات ساعت (CF) با توجه به اطلاعات در دسترس قابل محاسبه خواهد بود. هزینه سوت خست گازی میکروتوربین به ازای هر کیلووات ساعت را می‌توان از رابطه زیر بدست آورد: [۱۸]

$$C_F = \frac{C_{gas}}{\eta_e \times k \times HV} \quad (3)$$

$C_{gas}$ : قیمت هر متر مکعب گاز تحويلی ( $\$/m^3$ )

$HV$ : ارزش گرمایی گاز تحويلی ( $kcal/m^3$ )

$k$ : ضریب تبدیل کیلوکالری به کیلووات ساعت (

$1/860.425 kWh/kcal$

$\eta_e$ : راندمان الکتریکی میکروتوربین

### ۲-۳- مثال عددی از کاربرد سایش پیک

در اینجا مثالی عددی از به کارگیری میکروتوربین جهت سایش پیک بیان خواهد شد. اطلاعات یک میکروتوربین نمونه و همچنین اطلاعات مربوط به قیمت و مشخصات گاز طبیعی و نرخ بهره به ترتیب در جداول (۱) و (۲) آمده است.

جدول ۱: اطلاعات مربوط به یک میکروتوربین نمونه

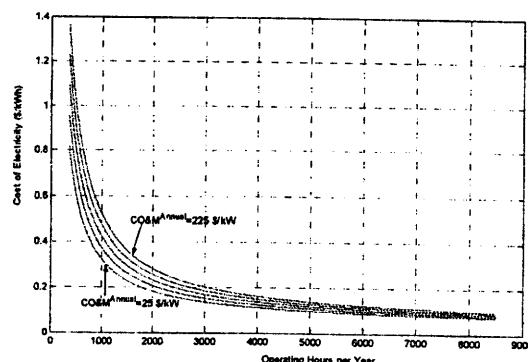
هزینه خرید میکروتوربین و تجهیزات جانبی موردنیاز	( $\$/kW$ ) ۱۰۰۰
هزینه نصب	( $\$/kW$ ) ۳۰۰
هزینه سالانه تعمیرات و بهره‌برداری	( $\$/kW$ ) ۵۰
عمر تقریبی واحد	۱۰ سال
راندمان الکتریکی	% ۲۳

جدول ۲: اطلاعات قیمت و مشخصات سوت خست گازی و نرخ بهره

ارزش حرارتی گاز طبیعی تحويلی	( $kcal/m^3$ ) ۹۰۰۰
نرخ بهره واقعی	% ۱۵
قیمت گاز طبیعی تحويلی	( $\$/m^3$ ) ۰/۱

تا ( $\$/m^3$ )  $C_{gas}=0.4$  با پلهای  $50 \times 10^3$  افزایش یافته است. در این نمودار هزینه‌های دیگر از قبیل هزینه سرمایه‌گذاری و نصب و هزینه تعمیرات بر حسب اطلاعات جدول (۱) ثابت فرض شده‌اند. در نمودار شکل (۳) مشاهده می‌گردد که با افزایش قیمت سوخت میکروتوربین، هزینه انرژی الکتریکی تولیدی آن نیز افزایش می‌یابد.

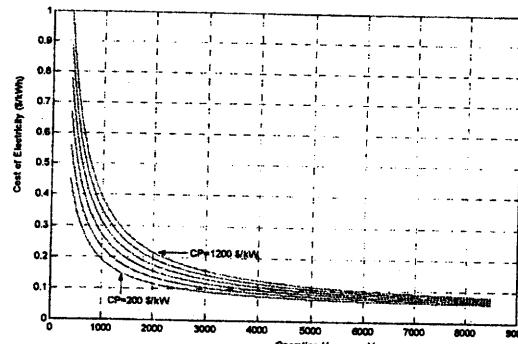
یکی دیگر از فاکتورهای تاثیر گذار بر هزینه انرژی الکتریکی میکروتوربین، قیمت قرارداد تعمیرات سالیانه می‌باشد. نمودار شکل (۴) تغییرات هزینه انرژی الکتریکی تحويلی توسط میکروتوربین بر حسب میزان ساعات بهره‌برداری سالانه را در قیمت‌های مختلف قرارداد تعمیرات سالیانه نشان می‌دهد.



شکل ۳: تغییرات قیمت انرژی الکتریکی یک میکروتوربین نمونه بر حسب میزان ساعات بهره‌برداری سالانه و در قیمت‌های مختلف قرارداد تعمیرات سالیانه

در نمودار شکل (۴)،  $CO&M^{Annual}$  نشان‌دهنده قیمت قرارداد تعمیرات سالیانه می‌باشد. قیمت قرارداد تعمیرات سالیانه از  $CO&M^{Annual} = 25 \$/kW$  تا  $CO&M^{Annual} = 225 \$/kW$  با پلهای  $50 \times 10^3$  افزایش یافته است. در این نمودار هزینه‌های دیگر از قبیل هزینه سرمایه‌گذاری و نصب و هزینه سوخت ثابت فرض شده‌اند.

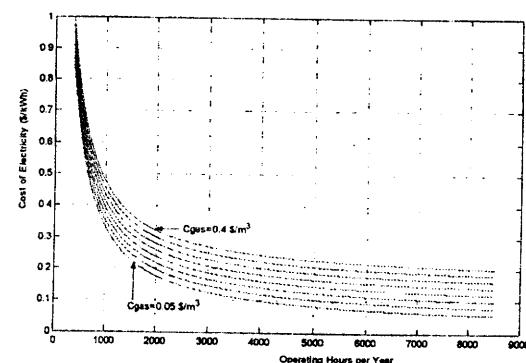
همانگونه که در شکل (۴) نشان داده شده است، هزینه انرژی الکتریکی میکروتوربین با افزایش هزینه تعمیرات افزایش یافته است. در شکل (۴)، نمودارها در میزان ساعات بهره‌برداری کم از هم دورتر شده‌اند و یا به عبارتی در میزان ساعات بهره‌برداری سالانه معمولاً کمتر است. تعمیرات میکروتوربین بر حسب میزان ساعات بهره‌برداری سالانه را در قیمت‌های مختلف سوخت تحويلی نمایش می‌دهد.



شکل ۴: تغییرات قیمت انرژی الکتریکی یک میکروتوربین نمونه بر حسب میزان ساعات بهره‌برداری سالانه و در هزینه‌های خرید مختلف

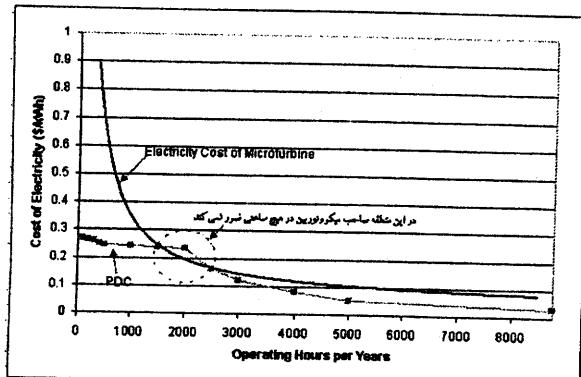
همانطور که در نمودار شکل (۲) مشاهده می‌شود، هزینه انرژی الکتریکی میکروتوربین با کاهش هزینه اولیه خرید میکروتوربین کاسته می‌شود. در شکل (۲)، نمودارها در میزان ساعات بهره‌برداری کم از هم دورتر شده‌اند و یا به عبارتی در میزان ساعات بهره‌برداری کم، تاثیر تغییرات هزینه اولیه میکروتوربین بر هزینه انرژی الکتریکی بیشتر است. با توجه به این امر به نظر می‌رسد در کاربرد سایش پیک که ساعات بهره‌برداری سالانه معمولاً کمتر است، هزینه اولیه کمتر میکروتوربین از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد.

یکی از فاکتورهای تاثیر گذار در هزینه انرژی الکتریکی تولیدی میکروتوربین قیمت سوخت تحويلی می‌باشد. نمودار شکل (۳)، تغییرات هزینه انرژی الکتریکی تحويلی توسط میکروتوربین بر حسب میزان ساعات بهره‌برداری سالانه را در قیمت‌های مختلف سوخت تحويلی نمایش می‌دهد.



شکل ۵: تغییرات قیمت انرژی الکتریکی یک میکروتوربین نمونه بر حسب میزان ساعات بهره‌برداری سالانه و در قیمت‌های مختلف سوخت تحويلی در نمودار شکل (۳)،  $C_{gas}$  قیمت سوخت گازی تحويلی به  $C_{gas}=0.05$  میکروتوربین می‌باشد. قیمت سوخت گازی از  $C_{gas}=0.05$  تا  $0.4 \$/m^3$  افزایش یافته است.

بر حسب میزان ساعت بهره‌برداری سالانه به همراه PDC سیستم نمونه در شکل (۵) نمایش داده آند.



شکل ۵ تغییرات قیمت انرژی الکتریکی یک میکروتوربین نمونه بر حسب میزان ساعت بهره‌برداری سالانه به همراه نمودار PDC

بر اساس نمودارهای شکل (۵)، در منطقه نشان داده شده با دایره نقطه چین، میکروتوربین می‌تواند هیچگاه در ساعت‌های اقتصادی بهره‌برداری نگردد. منظور از ساعت‌های غیر اقتصادی ساعتی از سال است که هزینه انرژی الکتریکی میکروتوربین از قیمت برق شبکه بیشتر است.

بر اساس این دو نمودار اگر میکروتوربین تنها در هنگامی که قیمت برق شبکه بیشتر از  $0.16/\text{ kWh}$  دلار بر کیلووات ساعت است بهره‌برداری گردد، میکروتوربین می‌تواند در حدود ۲۵۰۰ ساعت در سال مورد بهره‌برداری قرار گیرد. در این حالت هزینه تولید انرژی الکتریکی میکروتوربین در حدود  $0.16/\text{ kWh}$  دلار بر کیلووات ساعت خواهد بود. باید توجه داشت که در هیچ یک از این ساعت‌ها مالک میکروتوربین ضرر نخواهد کرد، زیرا قیمت برق شبکه در تمامی اوقات بهره‌برداری بزرگتر و یا مساوی هزینه تولید میکروتوربین خواهد بود. از طرفی نیز بازگشت سرمایه در ۱۰ سال کاملاً تضمین می‌باشد.

بر اساس نمودارهای شکل (۵)، اگر میکروتوربین در زمان‌هایی که قیمت برق شبکه بیشتر از  $0.08/\text{ kWh}$  دلار بر کیلووات ساعت است بهره‌برداری گردد، میکروتوربین می‌تواند در حدود ۴۰۰۰ ساعت مورد بهره‌برداری قرار گیرد. در این حالت هزینه تولید انرژی الکتریکی میکروتوربین در حدود  $0.11/\text{ kWh}$  دلار بر کیلووات ساعت خواهد بود. بدیهی است که در برخی ساعت‌ها که قیمت برق شبکه بین  $0.08/\text{ kWh}$  و  $0.11/\text{ kWh}$  دلار بر کیلووات است، مالک میکروتوربین متضرر

ساعات پیک به اندازه‌ای باشد که تولید پراکنده بصورت مفیدی در سال بهره‌برداری گردد. منظور از زیاد بودن میزان ساعت پیک، بالاتر بودن قیمت برق شبکه از هزینه تولید میکروتوربین در اکثر ساعت‌های روز می‌باشد.

فرض کنید که قیمت انرژی الکتریکی سالانه شبکه سراسری در سیستمی بر اساس جدول (۳) پیش‌بینی شده باشد. در جدول (۳) میزان ساعتی از سال که قیمت بزرگتر و یا مساوی یک عددی است نشان داده شده است. بر اساس جدول (۳) کمترین قیمت پیش‌بینی شده  $0.16/\text{ kWh}$  دلار بر کیلووات ساعت می‌باشد که در تمامی طول سال قیمت بزرگتر و یا مساوی این مقدار خواهد بود. می‌خواهیم کاربرد میکروتوربین در سایش پیک را در این سیستم مورد ارزیابی اقتصادی قرار دهیم. هزینه انرژی الکتریکی میکروتوربین بر اساس اطلاعات جداول (۱) و (۲) محاسبه خواهد شد. در ارزیابی موردنظر فرض شده است که نصب میکروتوربین تاثیری بر قیمت انرژی الکتریکی شبکه ندارد.

جدول ۳: قیمت تخمینی انرژی الکتریکی شبکه در یک سیستم نمونه

قیمت انرژی الکتریکی سال	میزان ساعت در (\$/kWh)
100	$\geq 0.27$
200	$\geq 0.265$
300	$\geq 0.26$
400	$\geq 0.25$
500	$\geq 0.246$
1000	$\geq 0.242$
1500	$\geq 0.24$
2000	$\geq 0.235$
2500	$\geq 0.16$
3000	$\geq 0.12$
4000	$\geq 0.08$
5000	$\geq 0.05$
8760	$\geq 0.03$

اگر نمودار مربوط به جدول (۳) را به همراه نمودار تغییرات هزینه انرژی الکتریکی تحويلی توسط میکروتوربین بر حسب میزان ساعت بهره‌برداری سالانه، رسم نماییم، می‌توان بر اساس این دو نمودار به استراتژی مناسب جهت به کارگیری میکروتوربین در سایش پیک دست یافت. نمودار مربوط به جدول (۳) مشابه نمودار LDC است با این تفاوت که در اینجا به جای بار، قیمت انرژی الکتریکی مد نظر می‌باشد. نمودار مربوط به جدول (۳) را  $PDC$  می‌نامیم. نمودار تغییرات هزینه انرژی الکتریکی تحويلی توسط میکروتوربین

به نظر می‌رسد در کاربرد سایش پیک، به کارگیری واحدهای تولید پراکنده که دارای هزینه نصب و سرمایه‌گذاری نسبتاً بالایی هستند، اقتصادی نباشد [۱۹]. میکروتوربین‌ها بر اساس قیمت‌های ارائه شده در سال ۲۰۰۳ در مرجع [۱۰]، دارای هزینه نصب و سرمایه‌گذاری نسبتاً بالایی هستند، اگرچه در مرجع [۲۰] پیش‌بینی شده است که در سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۰، قیمت بسته اصلی میکروتوربین به ۳۵۰-۴۰۰ دلار بر کیلووات برسد. در سایش پیک معمولاً ساعت‌بهره‌برداری میکروتوربین‌ها چندان زیاد نخواهد بود و همین امر با توجه هزینه اولیه نسبتاً زیاد میکروتوربین‌ها باعث بالا بودن قیمت انرژی الکتریکی تولیدی آنها برای مدت زمان بازگشت سرمایه مطلوب خواهد شد. پروسه‌های CHP را می‌توان در کاربردهای مختلف میکروتوربین اعمال نمود. در صورتی که نیاز حرارتی محلی منطقه بر زمان پیک باشد و یا پریود پیک بار بالا و در حدودی بیش از ۲۰۰۰ ساعت در سال باشد بازیافت حرارت نیز به صرفه خواهد بود. در صورت امکان اعمال پروسه CHP در کاربرد سایش پیک، این امر باعث کاهش هزینه تولید انرژی الکتریکی و حتی افزایش ساعت‌های قابل بهره‌برداری میکروتوربین خواهد شد.

#### ۱-۴ محاسبه هزینه تولید انرژی الکتریکی CHP

اگر پروسه CHP میکروتوربین اعمال نگردد، نیاز حرارتی موجود باید از طریق دیگری (مانند استفاده از یک بویلر) و با مصرف سوخت تامین شود. با اعمال پروسه CHP می‌توان این میزان سوخت را صرفه‌جویی نمود. میزان کاهش هزینه تولید برق میکروتوربین در اثر استفاده از حرارت گاز خروجی را می‌توان از رابطه زیر محاسبه نمود: [۱۸]

$$B_{CHP} = C_F \frac{\varepsilon_{rec}(\eta_r - \eta_e)}{\eta_b} \quad (4)$$

$B_{CHP}$ : سود استفاده از حرارت گاز خروجی (\$/kWh)

$C_F$ : هزینه سوخت میکروتوربین (\$/kWh)

$\eta_e$ : راندمان الکتریکی میکروتوربین در پروسه CHP

$\eta_r$ : راندمان الکتریکی و حرارتی کل در پروسه CHP

$\eta_b$ : راندمان حرارتی معادل یک بویلر معمولی و یا راندمان منبع حرارتی جایگزین برای انرژی حرارتی میکروتوربین

خواهد شد و این ساعتها جزو ساعت‌های غیر اقتصادی محسوب می‌گردند.

لازم به تذکر دوباره است که در محاسبات فرض بر این بوده است که مالک میکروتوربین می‌خواهد از بازگشت اصل سرمایه در ۱۰ سال اطمینان داشته باشد.

#### ۴- تولید توان و گرما (CHP)

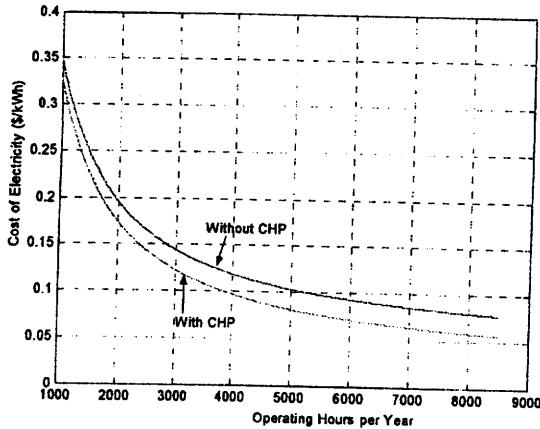
استفاده مفید از انرژی گاز خروجی میکروتوربین، بهره‌گیری از این نوع تولید پراکنده را از لحاظ اقتصادی به صرفه‌تر می‌سازد. حرارت گاز خروجی میکروتوربین در حدود ۷۰ درصد انرژی سوخت ورودی می‌باشد.

تولید توان و گرما در واقع استفاده بهینه از سوخت میکروتوربین می‌باشد. اعمال پروسه‌های CHP تنها در موقعی اقتصادی و مناسب است که نیاز حرارتی قابل توجهی در محل نصب میکروتوربین وجود داشته باشد. اکثر واحدهای CHP برای تامین نیازهای الکتریکی و گرمایشی در صنایع بزرگی همچون صنایع شیمیایی، تصفیه، چوب و کاغذ و همچنین صنایع غذایی نصب شده‌اند. البته در برخی موارد جهت رفع نیازهای گرمایشی و سرمایشی ساختمان‌های تجاری، هتل‌ها و سردهانه‌ها و همچنین در پروسه‌های حرارتی صنایع کوچک‌تر نیز مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

معمولًا تولید حرارت به همراه تولید توان، کمی هزینه نصب و سرمایه‌گذاری را افزایش می‌دهد (کمتر از ۱۰ درصد برای سیستم‌های صنعتی). در صورتی که نیاز حرارتی در حد مناسبی باشد، این هزینه افزایشی نسبت به ارزش انرژی حرارتی تولید شده بسیار به صرفه است. ضمن آنکه بسیاری از سازندگان میکروتوربین‌ها سیستم بازیافت حرارت را در بسته اصلی میکروتوربین لحاظ می‌کنند و اعمال پروسه CHP تنها مستلزم تحمل هزینه‌های اضافی نصب میکروتوربین می‌باشد.

راندمان سیستم CHP میکروتوربین‌ها تابعی از دمای گاز خروجی از بخش بهبودساز و سیستم بازیافت حرارت می‌باشد. بخش بهبودساز، دمای گاز خروجی میکروتوربین را کاهش می‌دهد که این مسئله باید در کاربردهای CHP مورد توجه قرار گیرد. در برخی موارد میکروتوربین‌های فاقد بخش بهبود ساز جهت اعمال پروسه‌های CHP استفاده می‌شوند.

کیلووات ساعت و با پرسه CHP، ۰/۰۵۸ دلار بر کیلووات ساعت است.



شکل ۶ تغییرات قیمت انرژی الکتریکی یک میکروتوربین نمونه بر حسب میزان ساعت بهره‌برداری سالانه در حالت اعمال و عدم اعمال CHP پرسه

$\epsilon_{rec}$ : ضریب بازیافت حرارت (درصدی از حرارت که واقعاً بازیافت شده است)

هزینه سوخت میکروتوربین ( $C_F$ ) از رابطه (۳) محاسبه می‌شود. در پرسه‌های CHP هزینه انرژی الکتریکی تولیدی توسط میکروتوربین را می‌توان از رابطه زیر محاسبه کرد:

$$COE_{CHP} = \frac{C_I}{h} (A | P, n, i) + C_{O&M} + C_F - B_{CHP} \quad (5)$$

$COE_{CHP}$ : هزینه برق میکروتوربین در CHP (\$/kWh)

$C_I$ : هزینه نصب و سرمایه‌گذاری میکروتوربین (\$/kW)

$C_{O&M}$ : هزینه تعمیرات و بهره‌برداری (\$/kWh)

$h$ : ساعت معادل بهره‌برداری بار کامل در سال (hours)

$A | P, n, i$ : فاکتور بازیافت سرمایه برای مدت بازگشت

سرمایه  $n$  سال و گرانخ بهره  $i$

#### ۲-۴-۱ مثال عددی از تاثیر اعمال پرسه CHP

بسیاری از سازندگان میکروتوربین‌ها سیستم بازیافت حرارت را در بسته اصلی میکروتوربین لحاظ می‌کنند. اطلاعات جداول (۱) و (۲) را در نظر بگیرید، با این فرض که در میکروتوربین موردنظر سیستم بازیافت حرارت نیز لحاظ شده باشد و هزینه نصب اضافی ناشی از اعمال پرسه CHP نیز با هزینه نصب تجهیزات تولید حرارت در صورت نبود پرسه CHP، جبران شود، هزینه‌ها را ثابت فرض می‌کنیم. بر اساس اطلاعات جداول (۱) و (۲)، می‌توان هزینه انرژی الکتریکی میکروتوربین در حالت اعمال CHP را محاسبه نمود. راندمان بویلر معمولی ۸۰ درصد، راندمان الکتریکی و حرارتی میکروتوربین ۶۷ درصد و ضریب بازیافت حرارت ۰/۹۵ در نظر گرفته شده است. در نمودار شکل (۶)، هزینه انرژی الکتریکی میکروتوربین در حالت اعمال و عدم اعمال پرسه CHP مقایسه شده است.

همانطور که در شکل (۶) مشاهده می‌شود، اعمال پرسه CHP باعث کاهش هزینه انرژی الکتریکی میکروتوربین به میزان ۰/۰۲۲ دلار بر کیلووات ساعت شده است. به بیان دیگر اعمال پرسه CHP در خصوص سیستم میکروتوربین مورد مطالعه، هزینه سوخت بر کیلووات ساعت را تقریباً ۵۰ درصد کاهش داده است. اگر میکروتوربین مورد مطالعه در حدود ۸۰۰۰ ساعت در سال مورد بهره‌برداری قرار گیرد، هزینه انرژی الکتریکی آن بدون پرسه CHP، ۰/۰۸ دلار بر

#### ۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله چگونگی محاسبه هزینه انرژی الکتریکی تولیدی میکروتوربین در کاربردهای سایش پیک و CHP و به ازای یک مدت بازگشت سرمایه مطلوب بیان شدند. در این مقاله مشخصات یک میکروتوربین و سیستم نمونه در این مقاله گردید و ارزیابی‌های اقتصادی در راستای دستیابی به استراتژی‌های مناسب به کارگیری میکروتوربین جهت سایش پیک در سیستم نمونه انجام شد. مشخص گردید که هزینه انرژی الکتریکی تولیدی میکروتوربین در سایش پیک و در یک مدت بازگشت سرمایه مشخص کاملاً به میزان ساعت بهره‌برداری در سال وابسته است. در ادامه، وابستگی هزینه تولید انرژی الکتریکی به پارامترهای مختلف اقتصادی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بیانگر این موضوع هستند که در کاربرد سایش پیک یا باید هزینه سرمایه‌گذاری اولیه و هزینه تعمیرات تولید پراکنده کم باشد و یا میزان ساعت پیک قیمت انرژی الکتریکی به اندازه‌ای باشد که تولید پراکنده بتواند بصورت مفیدی در سال بهره‌برداری گردد. با وجود بالا بودن نسبی هزینه اولیه میکروتوربین، بدلیل بالا بودن قیمت انرژی الکتریکی در سیستم نمونه، کاربرد میکروتوربین جهت سایش پیک از لحاظ اقتصادی به صرفه بود. در صورتی که در آینده در نتیجه پیشرفت تکنولوژی و

- [8] Fraser, P., "The Economics of Distributed Generation", International Energy Agency, Energy Prices and Taxes, 4th Quarter 2002.
- [9] "Ancillary Service Provision from Distributed Generation", Ilex Energy Consulting with the Manchester Centre for Electrical Energy, UMIST, 2004.
- [10] Hedman, B., et al, "Gas-Fired Distributed Energy Resource Technology Characterizations", joint project of the Gas Research Institute (GRI) and the NREL, October 2003.
- [11] Nichols, D. K. and Loving, K.P, "Assessment of Microturbine Generators", IEEE Power Engineering Society, Vol. 4, July 20031
- [12] Hamilton, S. L., " Project Title: Micro Turbine Generator Program", IEEE, Proceedings of the 33rd Hawaii International Conference, 2000.
- [13] Gutiérrez-Vera, J., "Mini Cogeneration Schemes in Mexico", IEEE Power Engineering Review, PP. 6-11, August 2001.
- [14] Staunton, R.H. and Ozpineci, B., "Microturbine Power Conversion Technology Review", Oak Ridge National Laboratory, 2003.
- [15] "Advanced microturbine system: Market assessment", Oak Ridge National Laboratory, Washington, Final Report, Technical Report, May 2003.
- [16] "Advanced microturbine systems program plan for fiscal years 2000 through 2006", U.S. Department of Energy, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, Office of Power Technologies, March 2000.
- [17] Lipman, T.E., et al, "Fuel cell system economics: comparing the costs of generating power with stationary and motor vehicle PEM fuel cell systems", Elsevier, Energy Policy 32 (2004), PP. 101-125, April 2004.
- [18] Buonanno, S., et al, "Economic Assessment of the Installation of Natural Gas-Fueled Microturbines and Results of Preliminary Tests", CIRED 2001, Conference Publication No. 482, June 2001.
- [19] Vittal, V., et al, "Fuel Cell Project", MidAmerican Energy, May 2003.
- [20] Fraisse, M. and Buchsbaum, L., "Environemnt Friendly High Quality, Haigh Availability Telecom Power Plant Architecture", IEEE, PP. 463-469, 2002.
- تولید انبوه، قیمت میکروتوربین کاهش یابد، این نوع تولید برآکنده با توجه به مزایای فراوان آن می‌تواند پتانسیل خوبی برای کاربرد سایش پیک داشته باشد. همانگونه که در مثال عددی مشاهده شد، هزینه انرژی الکتریکی میکروتوربین با اعمال پروسه CHP بدلیل استفاده بهینه از سوخت کاهش می‌یابد. در صورتی که در سایش پیک بتوان از اعمال پروسه CHP بهره برد، نه تنها هزینه تولید کاهش می‌یابد بلکه ساعت قابل بهره‌برداری میکروتوربین افزایش خواهد یافت که این امر خود اعمال پروسه CHP را اقتصادی‌تر می‌نماید.
- سپاسگزاری:**  
مؤلفین مقاله از حمایتهای امور پژوهش و فناوری شرکت گاز استان خراسان در انجام این تحقیق تقدیر و تشکر می‌نمایند.
- مراجع:**
- [1] Dussart, M., "Connection Requirement for Dispersed Generation: Evolutions of Existing Requirements and Need for Further Standardization", CIRED2001, Conference Publication, No. 482, June 2001.
  - [2] Gomez, J.C., and Morcos, M.M., "Coordinating Overcurrent Protection and Voltage Sag in Distributed Generation system", IEEE Power Engineering Review, PP. 16-19, February 2002.
  - [3] Zareipour, H., et al, "Distributed Generation: Current Status and Challenges", in proc. 36th Annual North American Power Symposium (NAPS), University of Idaho, August 20041
  - [4] Celli, G., and Pilo, F., "Optimal Distributed Generation Allocation in MV Distribution Networks", IEEE Power Engineering Society, PP. 81-86, May 2001.
  - [5] Garpinelli, G., et al, "Distributed Generation Siting and Sizing under Uncertainty", Power Tech Proceedings, IEEE Porto, Vol. 4, September 2001.
  - [6] Edward, M., Petrie, H., Willis, L., and Takahashi, M., "Distributed Generation in Developing Countries", World Bank.
  - [7] McKinley, S., "Distributed Generation: The Quiet Revolution", EPRI, Power Quality Newsletter, Vol. 10, No. 1, WINTER 1999-2000.