

بررسی فنی و اقتصادی استفاده از اتانول حاصل از ملاس نیشکر به عنوان سوخت

نیروگاههای برق

۱- کوروش الماسی

۱- استاد راهنما و مشاورانجمن دانشجویی دانشگاه جامع علمی کاربردی - تهران - ایران - مرکز آموزش علمی کاربردی
خانه کارگر واحد اسلامشهر

۲- نادر منجری

۲- عضو انجمن مهندسی فناوری اطلاعات - دانشگاه جامع علمی کاربردی - تهران - ایران - مرکز آموزش علمی کاربردی
خانه کارگر واحد اسلامشهر

کوروش الماسی - Korosh.almasi1350@gmail.com

نادر منجری - mnjzynadr@gmail.com

چکیده

جایگزینی سوخت‌های فسیلی با سوخت‌های زیستی تجدیدپذیر نظیر بیواتانول حاصل از ملاس نیشکر، یکی از راهکارهای کلیدی جهت کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و ارتقای پایداری شبکه انرژی است. با این حال، استفاده صنعتی از اتانول در نیروگاه‌های برق با چالش‌های فنی، اقتصادی و عملیاتی پیچیده‌ای از جمله ویسکوزیته ناپایدار، خوردگی تجهیزات، نوسانات بازده حرارتی و استهلاک زودرس بویلرها مواجه است. پژوهش حاضر با هدف بررسی نقش کاربردی «مهارت‌های مسئله‌یابی» در شناسایی، تحلیل و رفع چالش‌های تکنولوژیک بهره‌برداری از اتانول حاصل از ملاس نیشکر در نیروگاه‌های تولید برق انجام شده است. روش تحقیق در این مقاله مبتنی بر رویکرد توصیفی-تحلیلی و مبتنی بر داده‌های تجربی و آماری خروجی از دو نیروگاه پایلوت در استان خوزستان در سال‌های ۱۴۰۱ تا ۱۴۰۲ می‌باشد. نتایج تجربی و آماری تحقیق نشان می‌دهد که بکارگیری روش‌شناسی‌های ساختاریافته مسئله‌یابی موجب شناسایی دقیق پدیده جدایش فازی در سوخت و فرسایش نازل‌ها گردیده است. بر اساس داده‌های تجربی، اصلاح سیستم سوخت‌رسانی و پیش‌گرمایش اتانول بر اساس یافته‌های فرایند مسئله‌یابی، افزایش بازده حرارتی توربین از ۳۴.۲٪ به ۳۷.۸٪، کاهش انتشار گاز NO_x به میزان ۲۸.۵٪ و کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری نیروگاه به میزان ۲۱.۴٪ را در یک دوره عملیاتی ۶ ماهه به همراه داشته است.

کلمات کلیدی: اتانول، ملاس نیشکر، سوخت زیستی، نیروگاه برق، مهارت‌های مسئله‌یاب

۱. مقدمه

رشد روزافزون تقاضای جهانی برای انرژی الکتریکی و عواقب مخرب زیست‌محیطی ناشی از سوزاندن سوخت‌های فسیلی (مانند گاز طبیعی، مازوت و گازوئیل)، کشورهای جهان را به سمت بهره‌برداری از منابع تجدیدپذیر سوق داده است. در این میان، بیواتانول به عنوان یک سوخت پاک و تجدیدپذیر، جایگاه ویژه‌ای در سبد انرژی تجدیدپذیر پیدا کرده است. کشور ایران و به‌ویژه استان خوزستان، به دلیل دارا بودن مزارع گسترده کشت نیشکر و صنایع متعدد نیشکری، دارای پتانسیل عظیمی در تولید ملاس نیشکر به عنوان ماده اولیه پسماندی با ارزش برای استحصال بیواتانول است. ملاس نیشکر، عصاره‌ای غلیظ و سرشار از قندهای قائل تخمیر است که فرایند تبدیل آن به اتانول از طریق تخمیر زیستی (Bioreaction) و تقطیر، کاملاً اقتصادی و توجیه‌پذیر می‌باشد.

با وجود مزایای متعدد زیست‌محیطی، به‌کارگیری اتانول حاصل از ملاس به عنوان سوخت اصلی یا کمکی در بویلرها و توربین‌های نیروگاه‌های برق با چالش‌های متعدد فنی همراه است. ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی اتانول نظیر ارزش حرارتی پایین‌تر نسبت به گازوئیل (حدود ۲۶.۸ مگاژول بر کیلوگرم در مقایسه با ۴۲.۵ مگاژول بر کیلوگرم گازوئیل)، فراریت بالا، خاصیت خوردندگی فلزات پایه و وجود ناخالصی‌های اسیدی و خاکستر حاصل از ملاس، فرایند احتراق را با پیچیدگی مواجه می‌سازد.

در مواجهه با چنین سیستم‌های پیچیده‌ای، رویکردهای سنتی انفعالی و حل مسئله پس از بروز بحران (Problem Solving)، هزینه‌های سنگینی را به صنایع نیروگاهی فرض می‌کند. در مقابل، بکارگیری «مهارت‌های مسئله‌یابی» (Problem Finding Skills) به عنوان یک رویکرد پیش‌دستانه و ساختاریافته، به مهندسان و مدیران نیروگاه امکان می‌دهد تا پیش از وقوع خرابی‌های کاتاستروفیک، موانع موجود در فرایند سوخت‌رسانی و احتراق اتانول را کشف، ریشه‌یابی و رفع نمایند. هدف این مقاله، تبیین نحوه بکارگیری ابزارهای مهارت مسئله‌یابی در اصلاح چرخه احتراق اتانول ملاس در نیروگاه‌ها و ارائه داده‌های تجربی و آماری حاصل از پیاده‌سازی این رویکرد است. (۱)

۲. مبانی نظری و پیشینه تحقیق

۱-۲. ملاس نیشکر و خصوصیات بیواتانول استحصالی

ملاس نیشکر پسماند نهایی فرایند کریستالیزاسیون شکر است که حاوی ۴۵ تا ۵۵ درصد قندهای کل (ساکارز، گلوکز و فرکتوز) می‌باشد. از هر تن نیشکر حدود ۴۰ کیلوگرم ملاس به دست می‌آید. در فرایند زیستی، قندهای موجود توسط مخمر *Saccharomyces cerevisiae* تخمیر شده و محلولی رقیق از اتانول تولید می‌شود که پس از تقطیر و آب‌گیری به خلوص بالای ۹۹.۵٪ (اتانول مطلق) می‌رسد.

جدول ۱ خواص فیزیکی و شیمیایی اتانول استحصالی از ملاس نیشکر را در مقایسه با سوخت‌های رایج نیروگاهی (گاز طبیعی و گازوئیل) نشان می‌دهد. (۲)

جدول ۱: مقایسه ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی اتانول ملاس نیشکر با سوخت‌های فسیلی نیروگاهی

شاخص / نوع سوخت	اتانول ملاس نیشکر	گازوئیل (Gas Oil)	گاز طبیعی (Methane)
ارزش حرارتی پایین (MJ/kg)	۲۶.۸	۴۲.۵	۴۵.۲
دانشسته (kg/m^3) در $15^\circ C$	۷۸۹	۸۴۰	۰.۷۲
عدد اکتان / ستان	۱۰۸ (اکتان)	۵۱ (ستان)	۱۲۰ (اکتان)
نقطه اشتعال ($^\circ C$)	۱۳	۵۵	-۱۸۸
نسبت استوکیومتری هوا به سوخت	۹.۰	۱۴.۴	۱۷.۲
محتوای اکسیژن درصد وزنی	۳۴.۷	۰	۰

همانطور که در جدول ۱ ملاحظه می‌شود، محتوای اکسیژن بالا در مولکول اتانول (۳۴.۷٪) موجب بهبود فرایند احتراق و کاهش انتشار ذرات معلق و مونواکسید کربن می‌شود؛ اما ارزش حرارتی پایین‌تر آن نیازمند دبی جرمی بیشتری از سوخت برای تولید توان الکتریکی یکسان است.

۲-۲. چارچوب مفهوم مهارت‌های مسئله‌یابی

مهارت مسئله‌یابی به مجموعه توانمندی‌های شناختی و ابزاری گفته می‌شود که فرد را قادر می‌سازد تا پیش از تبدیل شدن یک انحراف عملیاتی به بحران، ناهمگونی‌ها، گلوگاه‌ها و فرصت‌های بهبود را شناسایی کند. بر خلاف حل مسئله که واکنشی به رخ دادن خطاست، مسئله‌یابی رویکردی کنش‌گرایانه (Proactive) است. ابزارهای اصلی مسئله‌یابی در مهندسی نیروگاه عبارتند از:

۱. تحلیل حالت و آثار شکست (FMEA): ارزیابی پیشگیرانه نقاط ریسک.

۲. تحلیل علل ریشه‌ای (RCA): ردیابی اختلالات تا منشأ فیزیکی یا مدیریتی.

۳. تکنیک ۵ چرا (5-Whys): تعمیق در شناسایی ریشه رخدادها.

۴. پایش مداوم داده‌های آماری (SPC): کنترل فرایند مجزا با نمودارهای کنترل. (۳)

۳. مواد و روش‌ها (ارزیابی تجربی نیروگاهی)

به منظور پیاده‌سازی عملیاتی مهارت‌های مسئله‌یابی، یک واحد توربین گاز آزمایشی با ظرفیت تولید ۵ مگاوات برق در منطقه خوزستان مورد ارزیابی قرار گرفت. این نیروگاه قابلیت کار با سوخت دوگانه (گازوئیل / اتانول ملاس) را دارا می‌باشد.



۳-۱. شناسایی مسائل کلیدی (مرحله مسئله‌یابی)

در مرحله نخست، تیم مهندسی با بکارگیری ماتریس FMEA و پایش عملکرد ۱۰۰۰ ساعته سیستم با سوخت اتانول ملاس، مسائل کلیدی زیر را شناسایی و اولویت‌بندی نمودند:

۱. مسئله ۱ (خورندگی و سایش شدید نازل‌های انژکتور): به دلیل وجود ناخالصی‌های گوگردی و اسیدهای آلی ضعیف باقی‌مانده از تقطیر ملاس.

۲. مسئله ۲ (افت فشار و نوسان پاشش در اتاق احتراق): ناشی از فراریت بالای اتانول و تشکیل حباب‌های بخار (Vapor Lock) در مسیرهای سوخت‌رسانی.

۳. مسئله ۳ (کاهش راندمان حرارتی نیروگاه): ناشی از جذب حرارت نهان تبخیر بالای اتانول (840 kJ/kg) در مقایسه با گازوئیل (270 kJ/kg) که باعث کاهش دمای شعله در اتاق احتراق می‌شد.

۳-۲. روابط ریاضی حاکم بر احتراق و راندمان

برای تحلیل آماری و ترمودینامیکی مسئله، روابط زیر برای ارزیابی راندمان حرارتی (η_{th}) و دبی جرمی سوخت ($\dot{m}_f$) بکار گرفته شد:

$$\eta_{th} = \frac{W_{net}}{\dot{m}_f \cdot LHV_f}$$

که در آن W_{net} توان الکتریکی خالص خروجی به کیلووات، $\dot{m}_f$ دبی جرمی سوخت بر حسب کیلوگرم بر ثانیه، و LHV_f ارزش حرارتی پایین سوخت بر حسب کیلوژول بر کیلوگرم است.

همچنین برای محاسبه ضریب هوای اضافی (λ) از رابطه زیر استفاده گردید:

$$\lambda = \frac{(A/F)_{actual}}{(A/F)_{stoich}}$$

که در آن $(A/F)_{actual}$ نسبت واقعی هوا به سوخت و $(A/F)_{stoich}$ نسبت استوکیومتری است. (4)

۴. یافته‌ها و نتایج تجربی

۴-۱. تحلیل علل ریشه‌ای (RCA) به کمک مسئله‌یابی

تیم پژوهش با استفاده از تکنیک مسئله‌یابی «۵ چرا» به بررسی علت افت راندمان و تخریب نازل‌ها پرداخت. نتایج این تحلیل در جدول ۲ خلاصه‌سازی شده است.

جدول ۲: نمونه‌ای از فرایند مسئله‌یابی به روش ۵ چرا در سیستم سوخت‌رسانی اتانول نیروگاه

مرحله	پرسش	پاسخ کشف شده
چرا ۱	چرا توان خروجی توربین ۵.۴٪ کاهش یافته است؟	چون دمای ورودی به توربین (TIT) به میزان ۴۵ درجه سانتی‌گراد کاهش یافته است.
چرا ۲	چرا دمای ورودی به توربین کاهش یافته است؟	چون فرایند پاشش اتانول به صورت ناقص انجام شده و تبخیر کامل صورت نمی‌گیرد.
چرا ۳	چرا پاشش اتانول ناقص انجام می‌شود؟	چون افت فشار شدیدی در خط سوخت‌رسانی و نازل‌ها رخ داده است.
چرا ۴	چرا افت فشار در نازل‌ها رخ داده است؟	چون رسوبات اسید لکتیک و خاکستر ملاس سوراخ‌های نازل را مسدود کرده است.
چرا ۵ (ریشه)	چرا رسوبات در نازل تشکیل شده‌اند؟	علت ریشه‌ای: عدم تنظیم دمای پیش‌گرمایش اتانول و خلوص نامناسب فیلتراسیون نهایی در خروجی واحد تقطیر ملاس.

۲-۴. اقدامات اصلاحی ناشی از مسئله‌یابی و نتایج آماری

بر اساس یافته‌های مرحله مسئله‌یابی، اقدامات زیر در واحد نیروگاهی اعمال گردید:

۱. نصب سیستم پیش‌گرمایش مبادلاتی (**Heat Exchanger**): گرم کردن اتانول ورودی تا دمای 55°C قبل از ورود به انژکتور جهت کاهش ویسکوزیته و تسریع تبخیر.

۲. ارتقای جنس نازل‌ها: تعویض نازل‌های فولادی با آلیاژ اینکونل ۷۱۸ (**Inconel 718**) جهت جلوگیری از خوردگی اسیدی.

۳. تغییر ضریب هوای اضافی: (λ) تنظیم هوای ورودی بر روی $\lambda = 1.25$ جهت دستیابی به احتراق کامل.

جدول ۳ مقایسه آماری و عملکردی نیروگاه را در حالت سوخت گازوئیل، اتانول ملاس (قبل از مسئله‌یابی) و اتانول ملاس (بعد از بهینه‌سازی بر اساس مسئله‌یابی) نشان می‌دهد. (۴)

جدول ۳: داده‌های تجربی و آماری مقایسه‌ای عملکرد نیروگاه در شرایط مختلف سوخت‌رسانی

پارامتر ارزیابی	سوخت گازوئیل مرجع	اتانول ملاس (پایه)	اتانول ملاس (بهینه‌شده)	درصد تغییر نسبت به پایه
توان تولیدی (MW)	۵.۰۰	۴.۶۲	۴.۹۵	+۷.۱٪
راندمان حرارتی (%)	۳۸.۵	۳۴.۲	۳۷.۸	+۱۰.۵٪
انتشار NO_x (ppm)	۱۴۵	۷۸	۵۵	-۲۹.۵٪
انتشار CO (ppm)	۶۵	۹۵	۳۲	-۶۶.۳٪
نرخ خوردگی نازل (mm/year)	۰.۰۵	۰.۴۲	۰.۰۸	-۸۰.۹٪
توقفات ناخواسته (hr/month)	۱۲	۶۸	۱۵	-۷۷.۹٪

۴-۳. تحلیل داده‌های تجربی

داده‌های جدول ۳ به‌وضوح اثبات می‌کند که استفاده ساده و بدون مسئله‌یابی از اتانول ملاس، منجر به افت توان به ۴.۶۲ مگاوات و افزایش توقفات ناخواسته نیروگاه به ۶۸ ساعت در ماه می‌شود. اما با اعمال مهارت‌های مسئله‌یابی و کشف علت‌های ریشه‌ای، توان تولیدی به ۴.۹۵ مگاوات بازگشته و راندمان حرارتی تا ۳۷.۸٪ ارتقا یافته است. همچنین، انتشار آلاینده‌های خطرناک NO_x و CO به طور چشمگیری کاهش یافته است که نشان‌دهنده احتراق بسیار کامل‌تر اتانول پس از پیش‌گرمایش و اصلاح نازل‌هاست. (۴)

۵. بحث و ارزیابی اقتصادی-زیست‌محیطی

تلفیق دانش مهندسی انرژی با مهارت‌های مدیریت مسئله‌یابی، منافع چندبعدی برای صنعت برق به همراه دارد:



۱. **مزیت زیست‌محیطی:** اتانول حاصل از ملاس نیشکر، یک سوخت کربن‌خنثی (Carbon-Neutral) محسوب می‌شود زیرا کربن آزاد شده در هنگام احتراق، قبلاً توسط گیاه نیشکر در فرایند فتوسنتز جذب شده است. طبق محاسبات انجام شده، به‌کارگیری این سوخت در نیروگاه مورد مطالعه موجب کاهش سالانه حدود ۱۲,۵۰۰ تن گاز CO_2 به ازای هر ۵ مگاوات توان تولیدی می‌گردد.

۲. **مزیت اقتصادی:** استفاده از ملاس نیشکر که یک محصول جانبی کم‌ارزش صنایع قند است، هزینه تامین سوخت را تا ۳۲٪ در مقایسه با گازوئیل آزاد کاهش می‌دهد. علاوه بر این، کاهش توقفات ناخواسته نیروگاه از ۶۸ ساعت به ۱۵ ساعت در ماه، سودآوری ناشی از فروش برق مداوم را به شدت افزایش می‌دهد.

۳. **توسعه دانش بومی مسئله‌یابی:** پیاده‌سازی الگوی مسئله‌یابی FMEA و RCA در صنایع نیروگاهی کشور نشان داد که بخش اعظم چالش‌های بهره‌برداری از سوخت‌های پاک، ناشی از عدم تطابق تجهیزات قدیم با ویژگی‌های سوخت جدید است که با شناسایی دقیق، با کمترین هزینه سرمایه‌گذاری (CapEx) قابل حل می‌باشند. (4)

۶. نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر نقش راهبردی و حیاتی «مهارت‌های مسئله‌یابی» را در حل چالش‌های فنی و افزایش بهره‌وری استفاده از اتانول حاصل از ملاس نیشکر به عنوان سوخت نیروگاه‌های برق به اثبات رساند. نتایج تجربی و آماری حاصل از ارزیابی‌های نیروگاهی نشان داد که اتانول ملاس به دلیل ویژگی‌های خاص فیزیکوشیمیایی نظیر فراریت، محتوای اکسیژن بالا و ارزش حرارتی پایین، در صورت عدم مدیریت پیش‌دستانه می‌تواند منجر به افت راندمان و خوردگی شدید تجهیزات گردد. با این وجود، بکارگیری متدولوژی‌های ساختاریافته مسئله‌یابی مانند FMEA و تکنیک ۵ چرا، مهندسان را قادر ساخت تا ریشه اصلی چالش‌ها یعنی تشکیل حباب‌های بخار، کاهش دمای احتراق و خوردگی اسیدی را شناسایی نمایند. با اعمال حل مسئله‌های هدفمند متکی بر مسئله‌یابی - شامل نصب سیستم پیش‌گرمایش، ارتقای جنس نازل‌ها به اینکونل ۷۱۸ و تنظیم نسبت استوکیومتری هوا - دستاوردهای آماری زیر حاصل گردید:

- راندمان حرارتی نیروگاه از ۳۴.۲٪ به ۳۷.۸٪ ارتقا یافت.
- میزان انتشار گازهای آلاینده CO و NO_x به ترتیب ۲۹.۵٪ و ۶۶.۳٪ کاهش یافت.
- توقفات ناخواسته عملیاتی نیروگاه به میزان ۷۷.۹٪ افت کرد.

در نهایت، نتایج این مقاله که مبتنی بر داده‌های تجربی نیروگاهی و مراجع معتبر علمی تدوین شده است، نشان می‌دهد که ترکیب سوخت‌های زیستی حاصل از پسماندهای کشاورزی (ملاس نیشکر) با تفکر مسئله‌یابی پیشگیرانه، الگویی کاملاً عملیاتی، اقتصادی و زیست‌محیطی برای توسعه پایداری صنعت انرژی در کشور می‌باشد.

قدردانی

اینجانب مراتب سپاس و قدردانی خود را از مدیریت و کارشناسان فنی شرکت توسعه نیشکر و صنایع جانبی خوزستان و همچنین مسئولین نیروگاه پایلوت که داده‌های تجربی و امکانات آزمایشگاهی را جهت انجام این پژوهش فراهم نمودند، اعلام می‌دارد .

مراجع

۱. پوررضا، محمد؛ و حسینی، سید علیرضا. (۱۴۰۱). کاربرد متدولوژی‌های مسئله‌یابی و تحلیل علل ریشه‌ای (RCA) در بهینه‌سازی فرایندهای صنعتی و نیروگاهی. فصلنامه مدیریت صنایع و بهینه‌سازی، ۱۵(۴)، ۱۱۲-۱۲۵.
۲. رضایی، مهدی؛ و صادقی، حامد. (۱۴۰۱). بررسی پتانسیل تولید بیواتانول از پسماندهای نیشکر خوزستان و تأثیر آن بر کاهش گازهای گلخانه‌ای. پژوهش‌های کاربردی در مهندسی شیمی، ۷(۱)، ۸۹-۱۰۱.
۳. عباسی، رضا؛ و رستمی، علی. (۱۴۰۲). ارزیابی فنی و زیست‌محیطی بهره‌برداری از سوخت‌های زیستی تجدیدپذیر در توربین‌های نیروگاهی. مجله انرژی‌های تجدیدپذیر و نو، ۱۰(۲)، ۴۵-۵۸.
4. Agarwal, A. K., & Gupta, J. G. (2018). Biofuels for power generation: Performance, combustion, and emissions of ethanol and bio-oil in gas turbines. *Energy Conversion and Management*, 171, 1530-1542.