

بررسی تأثیر پارامترهای مختلف بر فرآیند ماشین کاری جرقه ای الکتروشیمیایی سیم های متحرک (TW-ECSM)

چکیده: ماشین کاری جرقه ای الکتروشیمیایی سیم های متحرک (TW-ECSM) یکی از جدیدترین فرآیندهای ماشین کاری می باشد که پتانسیل ماشین کاری مواد پیشرفته غیر رسانا مانند شیشه، کوارتز، نیتريد سيلکون، کامپوزیت های مختلف و سرامیک را دارد و اغلب برای ایجاد حفره های پیچیده در مواد بر استحکام، به ویژه در صنعت هوافضا، برای تولید انبوه پره های توربین، قطعات موتور جت و نازل ها به کار می رود. مطالعات نشان می دهد که رویکردهای ترکیبی اعمال شده برای مدل سازی و بهینه سازی فرآیند ماشین کاری جرقه ای الکتروشیمیایی سیم های متحرک، معقول هستند. در این پژوهش از یک مدل ریاضی رگرسیون خطی مرتبه دوم به منظور پیش بینی میزان نرخ براده برداری در حین عملیات ماشین کاری و زبری سطح و بر هم کنش های مؤثر آن ها استفاده شده است. سپس با استفاده از روش آنالیز حساسیت آماری سوبل، تأثیر پارامترهای مختلف شامل ولتاژ، سرعت تغذیه سیم، تراکم الکترولیت و ضخامت قطعه کار، بر نرخ براده برداری و زبری سطح به دست آمده است. نتایج به دست آمده از آنالیز حساسیت نشان می دهند که ولتاژ بیشترین تأثیر را بر نرخ براده برداری و سرعت تغذیه سیم بیشترین اثر را بر زبری سطح داشته است.

واژه های راهنما: ماشین کاری جرقه ای الکتروشیمیایی سیم های متحرک، زبری سطح، نرخ براده برداری، کیفیت سطح، تحلیل حساسیت

محمد لنجابی شرابی
دانشجوی کارشناسی ارشد

احسان منصوری*

استادیار،
گروه مهندسی صنایع،
دانشکده فنی و مهندسی،
دانشگاه اراک، اراک

معین طاهری

دانشیار،
گروه مهندسی ساخت و تولید،
دانشکده فنی و مهندسی،
دانشگاه اراک، اراک

مقاله علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۱/۰۸/۱۵

پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۱۷

Mohammad
LAnjabi Sharahi
MSc Student

Ehsan Mansouri*

Assistant Professor,
Department of
Industrial
Engineering, Faculty of
Engineering, Arak
University, Arak

Moein Taheri

Associate Professor,
Department of
Manufacturing
Engineering, Faculty of
Engineering, Arak
University, Arak

Investigating the effect of different parameters on the travelling wire electro chemical spark machining process (TW-ECSM)

Abstract: Travelling Wire Electro Chemical Spark Machining (TW-ECSM) is one of the newest machining processes that has the potential to machine advanced materials such as glass, quartz, silicon nitride, various composites and ceramics, and has the factors of creating complex cavities in materials. Forging is used, especially in the aerospace industry, to produce turbine assemblies, jet engine parts, and nozzles. The Studies show that the combined methods applied to model and optimize the TW-ECSM process are reasonable. In this research, a second-order linear regression mathematical model has been used to predict the rate of chip removal during machining operations and surface roughness and their effective interactions. Then, using the Sobol statistical analysis method, various differences including voltage, wire feeding speed, electrolyte density and thickness of the work piece on the material removal rate and surface roughness have been obtained. The results obtained from the sensitivity analysis show that the voltage has the greatest effect on the chip removal rate and the wire feeding speed has the greatest effect on the surface roughness.

Keywords: Travelling wire electro chemical spark machining, Surface roughness, Material removal rate, Surface quality, Sensitivity analysis

۱- مقدمه

الکتروشیمیایی سیم‌های متحرک برای غلبه بر مشکل ماشین‌کاری سرامیک غیر رسانای Al_2O_3 پرداخته‌اند.

ملیک و مانا [۷] بیان نموده‌اند که ماشین‌کاری جرقه‌ای شیمیایی الکتروشیمیایی سیم‌های متحرک، ترکیبی از ماشین‌کاری الکتروشیمیایی^۵ (ECM) و ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی سیمی^۶ (WEDM) است. این فرآیند ماشین‌کاری می‌تواند به طور مؤثر برای ماشین‌کاری مواد غیررسانای سخت که ماشین‌کاری آن‌ها با روش‌های ماشین‌کاری غیرمتعارف مانند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی^۷ (EDM)، ماشین‌کاری الکتروشیمیایی و ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی سیمی و غیره امکان‌پذیر نیست، استفاده شود. راتان و مولیک [۸] بیان نموده‌اند که ماشین‌کاری مواد مهندسی پیشرو مانند سرامیک‌ها و کامپوزیت‌های مختلف که دارای سختی، شکنندگی، استحکام و عایق الکتریکی بالا هستند، بسیار دشوار می‌شود. آن‌ها به توسعه‌ی فرآیند راه‌اندازی ماشین‌کاری جرقه‌ی الکتروشیمیایی سیم‌های متحرک با کمک میدان مغناطیسی و استفاده از آن برای ماشین‌کاری مواد عایق الکتریکی پرداخته‌اند.

وو [۹] روشی ترکیبی با استفاده از ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی سیمی و انحلال الکتروشیمیایی با یکدیگر را در یک فرآیند ساده پیشنهاد داده و بررسی نموده است. یاداو و همکارانش [۱۰] به بررسی تجربی و مطالعه‌ی عملکرد ماشین‌کاری جرقه‌ی الکتروشیمیایی سیم‌های متحرک نانوکامپوزیت اپوکسی سیلیس پرداخته‌اند.

رویوان و همکارانش [۱۱] با استفاده از روش ترکیبی متشکل از روش تاگوچی و روش سطح پاسخ، مدل‌سازی تجربی فرآیند ماشین‌کاری جرقه‌ای الکتروشیمیایی سیم متحرک را انجام داده‌اند. آزمایشات آن‌ها بر روی شیشه بوروسیلیکات با استفاده از آرایه متعامد L27 با در نظر گرفتن پارامترهای ورودی مانند ولتاژ اعمال شده، زمان پالس، زمان خاموشی پالس، غلظت الکترولیت و سرعت تغذیه سیم همراه با عملکرد فرآیند مانند نرخ براده‌برداری انجام شده است. کومار و همکارانش [۱۲] تأثیر ولتاژ، غلظت الکترولیت و شکاف بین الکترودی را بر نسبت ابعاد میکرواسلات‌های ماشین‌کاری شده بر روی شیشه بوروسیلیکات با کمک فرآیند ماشین‌کاری جرقه‌ای الکتروشیمیایی سیم متحرک با استفاده از طراحی آرایه L9 تاگوچی بررسی نموده‌اند. نتایج آن‌ها نشان داده است

در سال‌های اخیر، صنایع هوافضا و صنایع دفاعی مدرن نیاز دارند که محصولات بسیار پیچیده آن‌ها در مسیری با دقت بالا، سرعت بالا، دمای بالا، فشار بالا و قدرت زیاد توسعه یابد. مواد به‌کاررفته در این محصولات عمدتاً شیشه، سرامیک و کامپوزیت است. شیشه بوروسیلیکات به دلیل بهبود استحکام، مقاومت حرارتی و مقاومت در برابر خوردگی برای این نوع محصولات اهمیت بیشتری پیدا می‌کند و کاربردهای گسترده‌ای در سیستم‌های میکرو الکترومکانیکی دارد [۱]. فرآیند ماشین‌کاری جرقه‌ای الکتروشیمیایی سیم متحرک^۱ (TW-ECSM) از پدیده تخلیه الکتروشیمیایی برای تولید گرما به‌منظور حذف مواد کار با ذوب و تبخیر استفاده می‌کند. برای اولین بار توسط کورافوجی به‌عنوان حفاری تخلیه الکتروشیمیایی برای ایجاد ریز چاله در قطعه کار شیشه ارائه شد [۲].

وتریچ و فاسیکو [۳] بیان نموده‌اند که ماشین‌کاری تخلیه‌ی الکتروشیمیایی، یک فناوری غیرمتعارف است که می‌تواند چندین ماده نارسای الکتریکی مانند شیشه یا برخی از سرامیک‌ها را ماشین‌کاری کند. آن‌ها برخی از عوامل محدودکننده‌ی اصلی این فرآیند را بررسی نموده و راه‌حل‌های ممکن را مورد بحث قرار داده‌اند. موندا و باتاچاریا [۴] بیان نموده‌اند که میکروماشین‌کاری الکتروشیمیایی^۲ (EMM) می‌تواند به‌عنوان یکی از بهترین روش‌های میکروماشین‌کاری برای ماشین‌کاری مواد رسانای الکتریکی، سخت و دشوار با ترکیب پارامترهای ماشین‌کاری مناسب استفاده شود. آن‌ها تلاش نمودند تا یک مدل ریاضی جامع برای همبستگی تأثیرات تعاملی و مرتبه‌ی بالاتر پارامترهای مختلف ماشین‌کاری، یعنی نسبت زمان روشنی/خاموش ولتاژ ماشین‌کاری، ولتاژ ماشین‌کاری، غلظت الکترولیت، فرکانس ولتاژ و فرکانس ارتعاش ابزار بر روی معیارهای میکروماشین‌کاری، ایجاد کنند.

بویان و یاداو [۵] تلاش نمودند تا کاربرد یک روش ترکیبی متشکل از روش تاگوچی^۳ (TM) همراه با روش سطح پاسخ^۴ (RSM) برای مدل‌سازی و بهینه‌سازی چند هدفه ماشین‌کاری جرقه‌ای الکتروشیمیایی سیم متحرک را توسعه دهند. بویان و مانا و کندال [۶] بر توسعه‌ی یک ماشین‌کاری جرقه‌ای

¹ Travelling Wire Electro-Chemical Spark Machining (TW-ECSM)

² Electrochemical Micro Machining (EMM)

³ Taguchi Methodology (TM)

⁴ Response Surface Methodology (RSM)

⁵ Electro Chemical Machining (ECM)

⁶ Wire-Cut Electrical Discharge Machining (WEDM)

⁷ Electrical Discharge Machining (EDM)

ابتدا، برای تعیین سطح پارامترهای ورودی مربوط به حداقل زبری سطح و حداکثر نرخ براده برداری استفاده می‌شود. این سطوح از پارامترهای ورودی بیشتر به عنوان یک مقدار مرکزی در طراحی ماتریس طراحی مرکب مرکزی قابل چرخش (CCRD) استفاده می‌شود [۵]. همچنین تلاش شده است تا تجزیه و تحلیل پارامتری بهینه بر روی فرآیند ماشین کاری جرقه‌ای الکتروشیمیایی سیم‌های متحرک انجام شود تا کنترل بهتری برای برش باکیفیت حاصل شود.

۲- مدل سازی

در این بخش ابتدا مختصری به تعیین نرخ براده برداری و کیفیت سطح در فرآیند ماشین کاری جرقه‌ای الکتروشیمیایی سیم‌های متحرک بر روی قطعه کار از جنس شیشه بوروسیلیکاتی پرداخته شده و سپس آنالیز حساسیت و روش‌های مختلف آن به طور مختصر بررسی شده و سپس با توجه به نیاز به بررسی تأثیر متقابل بین ورودی‌های مختلف، روش آنالیز حساسیت آماری سوبل جهت تحلیل و بررسی اثر پارامترهای مختلف انتخاب گشته و به شرح مختصر آن پرداخته شده است.

۲-۱- تعیین نرخ براده برداری و کیفیت سطح بر روی ماشین کاری جرقه‌ای الکتروشیمیایی با سیم

بویان و یاداوا مطالعات تجربی بر روی ماشین کاری جرقه‌ای الکتروشیمیایی با سیم انجام داده‌اند. شکل (۱) - (الف) نمودار شماتیک و (ب) نمای عکاسی واقعی تنظیمات آزمایشی آن‌ها را نشان می‌دهد. پارامترهای متغیر فرآیند ورودی (عوامل کنترل) گرفته شده شامل ولتاژ، غلظت الکترولیت، سرعت تغذیه سیم و ضخامت قطعه کار بوده‌اند. یک سری آزمایش جامع برای تعیین محدوده‌ی پارامتر برای یک برش باکیفیت انجام شده است. در آزمایش‌ها از میله گرافیتی (قطر ۸ میلی‌متر، طول ۵۵ میلی‌متر) به عنوان آند و سیم برنجی با قطر ۰/۲۵ میلی‌متر به عنوان کاتد استفاده شده است [۵].

در کار حاضر، مقادیر کمتر زبری سطح و مقادیر بالاتر نرخ براده برداری مطلوب است. این ویژگی‌های در روش تاگوچی به عنوان ویژگی‌های نوع کمتر از بهتر (LB) و نوع بالاتر از بهتر (HB) نامیده می‌شوند.

که ولتاژ به عنوان عامل مؤثر اصلی و پس از آن غلظت الکترولیت و شکاف بین الکتروده پارامترهای بعدی تأثیرگذار بوده‌اند.

موهیتکار و همکارانش [۱۳] حوزه‌ی کاربرد فرآیند ماشین کاری جرقه‌ای الکتروشیمیایی را از مواد غیررسانا به مواد نیمه‌رسانا یعنی کاربید سیلیکون (SiC) گسترش داده‌اند. آن‌ها به منظور افزایش سرعت براده برداری و برای کاهش اندازه ورودی و همچنین زبری سطح، از روش همرفت مغناطیسی هیدرودینامیکی (MHD) استفاده نموده‌اند.

صفی‌خانی و همکارانش [۱۴] به تجزیه و تحلیل حساسیت پارامترهای مؤثر بر جریان نانوسیال در لوله‌های تخت با استفاده از روش تحلیل حساسیت آماری ای‌فست پرداخته‌اند. خورشیدی و همکارانش [۱۵] به تجزیه و تحلیل حساسیت صفحات مستطیلی کامپوزیت چند لایه ارتعاشی در تعامل با سیال نامرغوب با استفاده از روش آماری ای‌فست پرداخته‌اند. طاهری و بطحایی [۱۶] به بررسی عوامل ماشین کاری قطعات متالورژی پودر بازیابی، از براده کاری و تف جوشی با طراحی آزمایش‌ها و آنالیز حساسیت آماری پرداخته‌اند. مصطفوی و طاهری [۱۷] تأثیر پارامترهای هندسی بر راندمان حرارتی و مصرف سوخت هیت‌های یک ایستگاه کاهش فشار گاز طبیعی با استفاده از تحلیل حساسیت آماری سوبل بررسی نموده‌اند.

مطالعات صورت گرفته نشان می‌دهد که تاکنون از روش‌های آماری آنالیز حساسیت برای بررسی دقیق و کمی میزان تأثیرگذاری پارامترهای مختلف بر نرخ براده برداری در فرآیند ماشین کاری جرقه‌ای الکتروشیمیایی سیم‌های متحرک استفاده نشده است.

در این مقاله، به بررسی کلی فرآیند ماشین کاری جرقه‌ای الکتروشیمیایی سیم‌های متحرک پرداخته شده است و برای اولین بار تحلیل حساسیت انجام و نمودارها بررسی گردیده است. برای این منظور، روش‌های مختلف آنالیز حساسیت مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. پس از آن، روش آنالیز حساسیت آماری سوبل مورد بررسی قرار گرفته است و با استفاده از این روش به بررسی تأثیر پارامترهای ورودی مختلف بر روی پارامترهای خروجی زبری سطح و نرخ براده برداری پرداخته شده است. زبری سطح (Ra) و نرخ براده برداری (MRR) به عنوان خروجی‌های مدل در نظر گرفته شده‌اند و اثر پارامترهای ورودی بر آن‌ها به روش تحلیل حساسیت آماری بررسی شده است.

¹ Magneto-Hydro Dynamic

است. تأثیر عوامل کنترل مختلف بر MSNR در معادلات (۷) و (۸) نشان داده شده است.

از نظر ریاضی، نسبت S/N برای ویژگی‌های کیفیت نوع LB و HB به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\eta = -10 \log_{10}(MSD) \quad (۱)$$

$$\text{FOR LB type, } MSD = \frac{1}{n \sum_{i=1}^n y_i^2} \quad (۲)$$

$$\text{FOR HB type, } MSD = \frac{1}{n \sum_{i=1}^n y_i} \quad (۳)$$

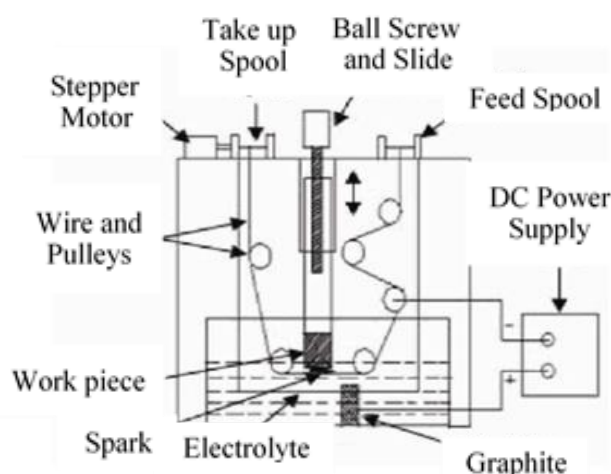
که در آن y_i داده‌های مشاهده شده یا ارزش کیفی آزمایش چهارم است و n تعداد آزمایش‌ها در شرایط مشابه آزمایش است. در بهینه‌سازی چند هدفی، یک نسبت S/N کلی برای همه ویژگی‌های کیفیت به جای نسبت S/N جداگانه برای هر مشخصه کیفیت محاسبه می‌شود. این نسبت کلی S/N به نام نسبت S/N چندگانه (MSNR) معروف است. MSNR برای آزمایش زام مطابق زیر محاسبه می‌شود.

$$\eta_j^e = 10 \log_{10}(y_j) \quad (۴)$$

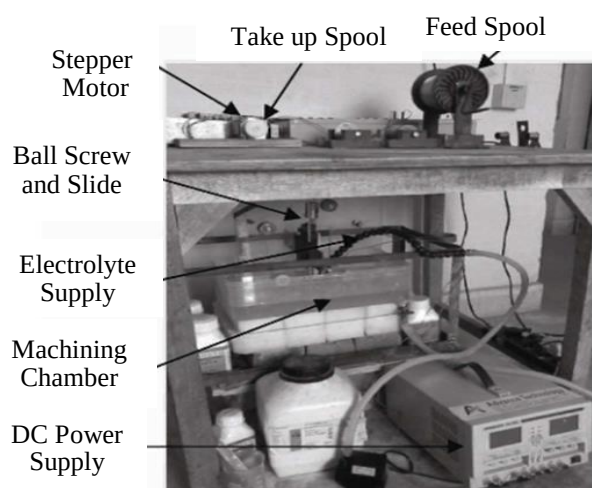
$$y_j = \sum_{i=1}^p w_i y_{ij} \quad (۵)$$

$$y_{ij} = \frac{L_{ij}}{L_i} \quad (۶)$$

که در آن y_j کل کاهش کیفیت نرمال شده در آزمایش j است، w_i نشان‌دهنده ضریب وزنی برای ویژگی کیفیت i است، p تعداد ویژگی‌های کیفیت و y_{ij} افت کیفیت نرمال شده مرتبط با ویژگی کیفیت i th در شرایط آزمایشی j است و از حداقل صفر تا حداکثر یک متغیر است. L_{ij} افت کیفیت یا MSD برای مشخصه کیفیت یکم در آزمایش j و L_i^* حداکثر افت کیفیت برای مشخصه کیفیت یکم در بین تمام آزمایش‌های آزمایشی است. مقادیر از دست دادن کیفیت برای ویژگی‌های کیفی مختلف در هر اجرای آزمایشی با استفاده از معادلات (۲) و (۳) محاسبه می‌شود. از طریق نرم‌افزار MINITAB پارامترهای بهینه برش فرآیند با چندین ترکیب وزنی از ویژگی‌های کیفی به دست آمده است. ارزش ضریب وزنی به قضاوت مهندسی بستگی دارد. سطوح پارامترها در جدول (۱) نشان داده شده



(الف) نمودار شماتیک



(ب) عکس دستگاه

شکل ۱ (الف) نمودار شماتیک، (ب) نمای عکاسی از میز توسعه یافته جهت راه‌اندازی TW-ECSM [۵]

جدول ۱ سطوح پارامترها

نماد	عوامل کنترلی	واحدها	سطح کد				
			-۲	-۱	۰	۱	۲
A	ولتاژ	Vol	۴۰	۴۵	۵۰	۵۵	۶۰
B	غلظت الکترولیت	g/l	۱۵۰	۲۰۰	۲۵۰	۳۰۰	۳۵۰
C	سرعت تغذیه سیم	m/min	۰/۶	۱/۲	۱/۸	۲/۴	۳
D	ضخامت قطعه کار	mm	۲	۳	۴	۵	۶

می‌کند. در این روش می‌توان اثر متقابل بین چندین ورودی را بر روی خروجی مشخص کرد. روش سوپل یکی از روش‌های آنالیز حساسیت آماری و مستقل از مدل است که بر پایه‌ی تجزیه واریانس می‌باشد. از این روش می‌توان برای توابع و مدل‌های غیرخطی و غیریکنواخت استفاده کرد.

سطوح بهینه فاکتورهای کنترلی مختلف یا پارامترهای فرآیند ورودی برای حداقل زبری سطح و حداکثر نرخ براده‌برداری به‌دست‌آمده عبارت‌اند از ولتاژ در سطح ۲ (۵۰ ولت)، غلظت الکترولیت در سطح ۳ (250 g/l)، سرعت تغذیه سیم در سطح ۱ (۱/۸ متر بر دقیقه)؛ و ضخامت قطعه کار در سطح ۲ (۴ میلی‌متر). به‌طورکلی، یک مدل رگرسیون مرتبه دوم در زیر ارائه‌شده است که در روش زبری سطح استفاده می‌شود زیرا مدل‌های مرتبه اول اغلب عدم تناسب را نشان می‌دهند [۱۸].

$$Y = b_0 + \sum_{i=1} b_{ii} x_i^2 + \sum_i \sum_j b_{ij} x_i x_j \quad (9)$$

۳- آنالیز حساسیت پارامترها

در این بخش تأثیر پارامترهای فرآیند شامل ولتاژ (V)، غلظت الکترولیت (EC)، سرعت تغذیه سیم (Wv) و ضخامت قطعه کار (Wt) بر زبری سطح و نرخ براده‌برداری در فرآیند ماشین‌کاری جرقه‌ای الکتروشیمیایی سیم‌های متحرک بر اساس مدل‌سازی ریاضی یعنی معادلات (۷) و (۸) تحلیل می‌شوند. شکل‌های (۲) تا (۹) پراکندگی نقاط نرخ ماشین‌کاری با تغییرات هم‌زمان چهار پارامتر ورودی را نشان می‌دهد. نقاط پراکنده موجود در این شکل‌ها با استفاده از نرم‌افزار سیملب و به روش سوپل استخراج شده‌اند. در روش سوپل برخلاف روش‌های گرافیکی که در آن‌ها تمامی ورودی‌ها به‌جز یک ورودی ثابت است، با استفاده از الگوریتمی خاص تمامی پارامترها به‌طور هم‌زمان تغییر می‌نمایند، بنابراین نقاط در این نمودارها به صورت پراکنده درآمده و برای هر مقدار ورودی، خروجی‌های مختلفی حاصل می‌گردد که ناشی از تغییر سایر ورودی‌ها به صورت هم‌زمان است.

۳-۱- اثر پارامترهای فرآیند بر نرخ براده‌برداری

تأثیر ولتاژ بر روی نرخ براده‌برداری در شکل (۲) نشان داده شده است. نرخ براده‌برداری در حین فرآیند ماشین‌کاری جرقه‌ای الکتروشیمیایی سیم‌های متحرک با افزایش ولتاژ افزایش نسبتاً زیادی می‌یابد، زیرا در ولتاژ بالا تعداد زیادی

$$Ra = 7.57143 - 0.7000X_1 + 102333X_2 - 0.0833X_3 + 0.4000X_4 + 1.4779X_{12} + 0.3029X_{22} + 0.2029X_{32} + 0.3779X_{42} + 0.9500X_{1X_2} \quad (7)$$

$$- 1.1750X_{1X_3} - 0.1750X_{1X_4} - 0.5000X_{2X_3} + 0.2000X_{2X_4} + 0.3750X_{3X_4}$$

$$MRR = 0.4905 + 0.1641X_1 - 0.0054X_2 + 0.0442X_3 + 0.0081X_4 - 0.0238X_{12} - 0.0018X_{22} - 0.0199X_{32} + 0.0197X_{42} - 0.0273X_{1X_2} + 0.0125X_{1X_3} - 0.0126X_{1X_4} + 0.0291X_{2X_3} + 0.0257X_{2X_4} + 0.0239X_{3X_4}$$

که در آن X_1 ولتاژ (ولت)، X_2 غلظت الکترولیت (g/l)، X_3 سرعت تغذیه سیم (m/min) و X_4 ضخامت قطعه کار (mm) است.

۲-۲- روش‌های آنالیز حساسیت

آنالیز حساسیت ابزاری جهت بررسی سیستم‌ها و تعیین تأثیر پارامترهای ورودی بر روی متغیرهای خروجی سیستم‌ها می‌باشد. آنالیز حساسیت را به چند طریق طبقه‌بندی می‌کنند. برحسب کاربرد که به نوع قطعی یا احتمالی است یا برحسب فرم مدل که به روش‌های گرافیکی، ریاضی و آماری طبقه‌بندی می‌شود.

• روش گرافیکی:

در این روش تحلیل حساسیت، حساسیت را در فرم‌هایی به‌صورت نمودار و جدول یا سطوح نمایش می‌دهند. از روش گرافیکی عموماً برای نشان دادن تغییرات خروجی‌ها تحت تأثیر ورودی‌ها استفاده می‌شود.

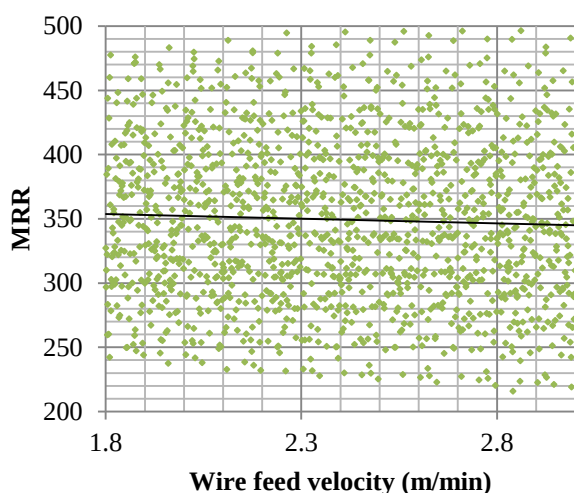
• روش ریاضی:

در روش ریاضی، حساسیت را از روی تغییرات خروجی برحسب تغییرات ورودی به دست می‌آورند. این روش‌ها عموماً درگیر محاسباتی هستند که به بررسی خروجی به ازای مقدار کمی تغییر در ورودی می‌پردازد.

• روش آماری:

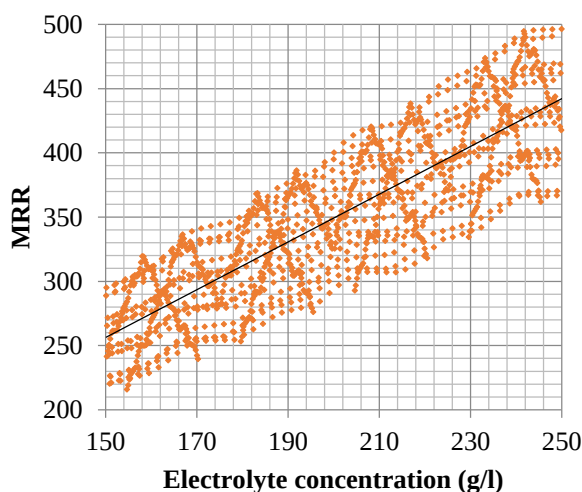
این تحلیل حساسیت به‌صورت توزیع احتمالی به شبیه‌سازی ورودی می‌پردازد، سپس تأثیر این ورودی را بر خروجی ارزیابی

بالاتر اتفاق می‌افتد. افزایش سرعت تغذیه سیم به این معنی است که شرایط انحلال الکتروشیمیایی به تدریج با عمل تخلیه پوشانده شده است، در نتیجه چگالی جریان بالا، منجر به تکامل مقدار فراوانی از حباب‌های گاز هیدروژن می‌شود که باعث تخلیه می‌شود؛ بنابراین، انرژی تخلیه در هر جرقه افزایش می‌یابد و در نتیجه نرخ براده‌برداری را افزایش می‌دهد.



شکل ۴ نمودار تغییرات نرخ براده‌برداری با ولتاژ و سرعت تغذیه سیم

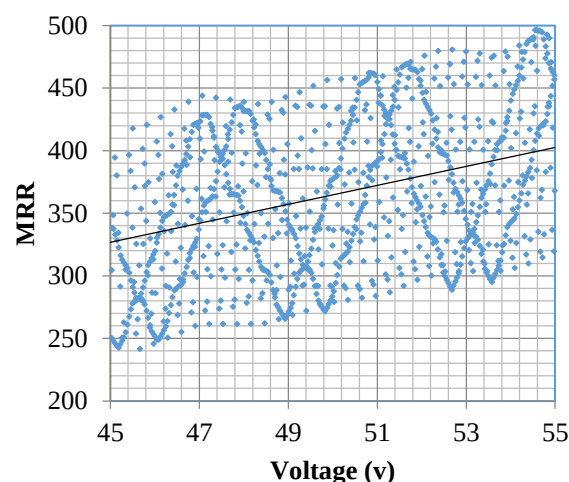
شکل (۵) اثر غلظت الکترولیت را بر نرخ براده‌برداری نشان می‌دهد. از نمودار پاسخ مشاهده شده است که نرخ براده‌برداری به صورت خطی و با شیب نسبتاً زیاد با افزایش غلظت‌های مختلف الکترولیت افزایش می‌یابد. این امر به دلیل کاهش رسانایی ویژه الکترولیت پس از رسیدن به سطح غلظت الکترولیت ۱۲۵۰ g/l رخ می‌دهد که در نتیجه جریان مدار را کاهش می‌دهد.



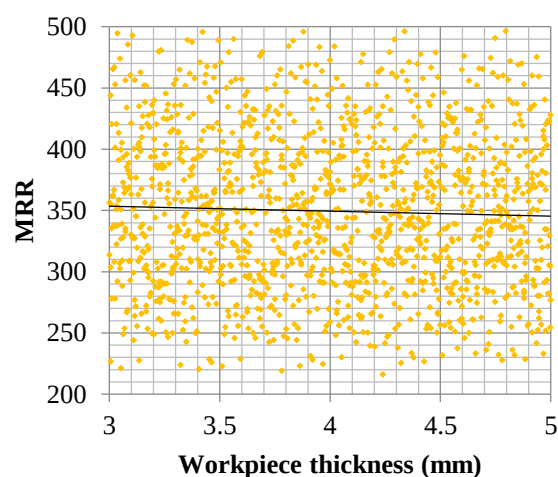
شکل ۵ نمودار تغییرات نرخ براده‌برداری با ولتاژ و غلظت الکترولیت

حباب گاز در دیواره کناری ابزار جمع می‌شود و در نتیجه جرقه زیادی در ناحیه جرقه ایجاد می‌شود.

تأثیر ضخامت قطعه کار، بر روی نرخ براده‌برداری در شکل (۳) نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد که نرخ براده‌برداری با افزایش ضخامت قطعه کار افزایش اندکی می‌یابد، زیرا ناحیه‌ی تخلیه در مجاورت سیم به بالای قطعه کار منتقل می‌شود و غلظت حباب بیشتری روی سیمی که از شیار عبور می‌کند، ایجاد می‌شود و در نتیجه انرژی تخلیه بالاتری در هر جرقه ایجاد می‌شود.



شکل ۲ نمودار تغییرات نرخ براده‌برداری تغییر ولتاژ

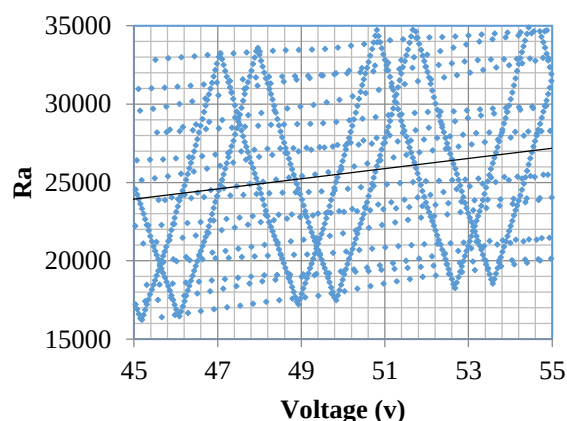


شکل ۳ نمودار تغییرات نرخ براده‌برداری با تغییر ضخامت قطعه کار

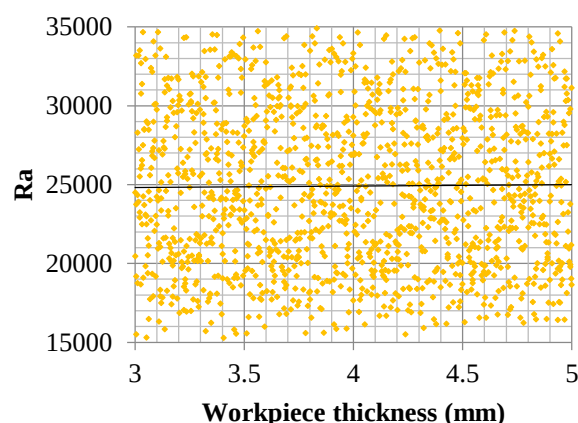
شکل (۴) اثر سرعت تغذیه بر نرخ براده‌برداری را نشان می‌دهد. نمودار نشان می‌دهد که نرخ براده‌برداری با افزایش سرعت‌های مختلف تغذیه سیم افزایش اندکی می‌یابد. این موضوع به دلیل انرژی تخلیه بالاتر در هر واحد است. جرقه در سطح پایین‌تر از سرعت تغذیه سیم و تولید تعداد بیشتری حباب گاز در ولتاژ

۳-۲- اثر پارامترهای فرآیند بر زبری سطح

اثر ولتاژ بر روی زبری سطح در فرآیند ماشین کاری جرقه‌ای الکتروشیمیایی سیم‌های متحرک در شکل (۶) قابل مشاهده می‌باشد. از نمودار می‌توان مشاهده کرد که زبری سطح با افزایش ولتاژ، افزایش پیدا می‌کند. این موضوع به دلیل این واقعیت است که برای ایجاد کانال پلاسما به انرژی بیشتری نیاز است که باعث ایجاد دهانه کم عمق روی سطح ماشین کاری شده و قسمت دوم منحنی به دلیل تعداد زیادی حباب گاز در نتایج محیط ابزار (سیم) تولید می‌شود. جرقه بیشتر که باعث ایجاد دهانه عمیق تر روی قطعه کار می‌شود. اثر ضخامت قطعه کار، بر روی زبری سطح در فرآیند ماشین کاری جرقه‌ای الکتروشیمیایی سیم‌های متحرک نیز در شکل (۷) قابل مشاهده می‌باشد. در مورد ضخامت قطعه کار دلیل آن این است که انسداد در مسیر جریان منجر به تشکیل حباب کمتری روی سیم عبوری از شیار می‌شود و انرژی تولید شده روی سیم دور از قطعه کار در گرم کردن الکترولیت هدر می‌رود.

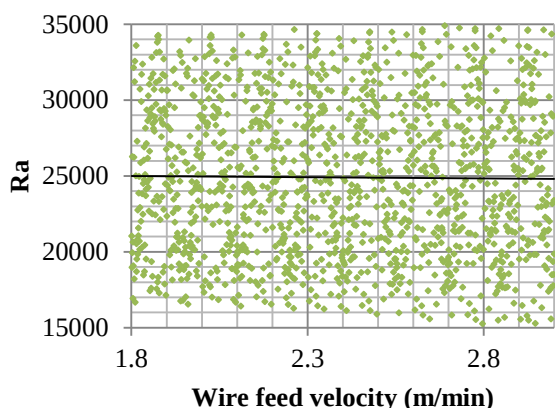


شکل ۶ نمودار تغییرات زبری سطح با ولتاژ



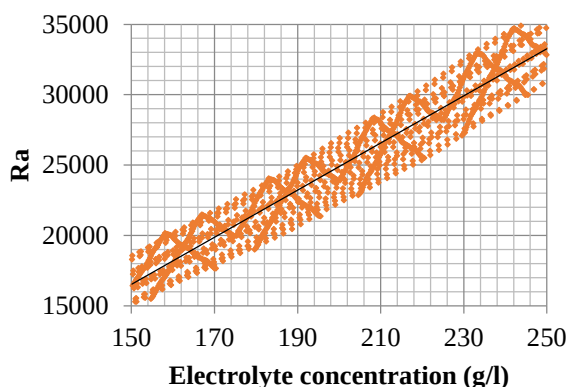
شکل ۷ نمودار تغییرات زبری سطح با ضخامت قطعه کار

شکل (۸) اثر سرعت تغذیه سیم را بر زبری سطح نشان می‌دهد. با توجه به نمودار مشاهده شد که زبری با تغییر در سرعت تغذیه سیم به صورت منحنی خطی و با نرخ کمی کاهش می‌یابد. دلیل این موضوع این است که در سرعت تغذیه سیم بالاتر، تشکیل حباب بسیار کمتری در دیواره جانبی ابزار ایجاد می‌شود که باعث کاهش دهانه در سطح ماشین کاری شده می‌شود.



شکل ۸ نمودار تغییرات زبری سطح با ولتاژ و سرعت تغذیه سیم

تأثیرات غلظت الکترولیت بر زبری سطح بر اساس یک مدل ریاضی مرتبه دوم همان طور که در شکل (۹) نشان داده شده است تعیین می‌شود. از شکل (۹) مشاهده می‌شود که زبری سطح با افزایش ولتاژ زمانی که غلظت الکترولیت در سطح پایین تر نگه داشته می‌شود، کاهش می‌یابد. در سطح بالاتر غلظت الکترولیت، زبری سطح با افزایش ولتاژ افزایش می‌یابد زیرا غلظت الکترولیت بالاتر به معنای رسانایی ویژه بالاتر به معنای افزایش رسانایی الکترولیت است که منجر به جریان مدار بیشتر می‌شود. در مقادیر بالاتر جریان مدار به این معنی است که انرژی گرمایی بیشتری به قطعه کار نفوذ می‌کند و در نتیجه مقدار بیشتری از عمق دهانه و در نتیجه مقدار بالاتر زبری سطح تولید می‌شود.



شکل ۹ نمودار تغییرات زبری سطح با ولتاژ و تراکم الکترولیت

۴- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

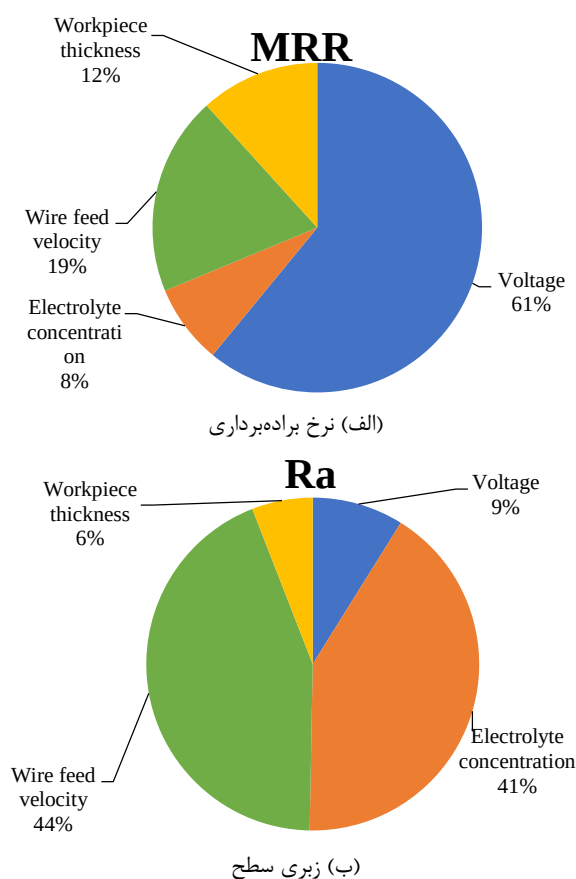
در مطالعه‌ی حاضر، از روش آنالیز حساسیت آماری، جهت بررسی اثر پارامترهای مختلف بر نرخ براده‌برداری و زبری سطح استفاده شد. بر اساس مطالعات انجام شده، نتایج به شرح زیر خلاصه می‌شود:

- (۱) پارامترهای ولتاژ و سرعت تغذیه سیم، مؤثرترین پارامترهای مؤثر بر نرخ براده‌برداری می‌باشند.
- (۲) پارامترهای غلظت الکترولیت و سرعت تغذیه سیم، مؤثرترین پارامترهای مؤثر بر زبری سطح می‌باشند.
- (۳) به‌طور کلی ضخامت قطعه کار تأثیر کمتری بر زبری سطح و نرخ براده‌برداری در مقایسه با سایر پارامترهای فرآیند دارد.
- (۴) برای دستیابی به مقدار کمتر زبری سطح و مقدار بیشتر نرخ براده‌برداری، مقدار بیشتری از سرعت تغذیه سیم مورد نیاز است.

۵- مراجع

- [1] Kurafuji, H., and Suda, K., Electrical discharge drilling of glass, *Annals of the CIRP*, Vol. 16, pp. 415-419, (1968).
- [2] Jain, V. K., Rao, P. S., Choudhury S. K., and Rajurkar, K. P., Experimental investigations into traveling wire electrochemical spark machining (TW-ECSM) of composites, *ASME Transaction Journal of Engineering for Industry*, Vol. 113, No. 1, pp. 75-84, (1991).
- [3] Wuthrich, R., and Fascio, V., Machining of non-conducting materials using electrochemical discharge phenomenon-an overview, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 45, No. 9, pp. 1095-1108, (2005).
- [4] Munda, J., and Bhattacharyya, B., Investigation into electrochemical micromachining (EMM) through response surface methodology based approach. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 35, No. 7-8, pp. 821-832 (2006).
- [5] Bhuyan, B. K., and Yadava, V., Experimental modeling and multi-objective optimization of traveling wire electrochemical spark machining (TW-ECSM) process, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 27, No. 8, pp. 2467-2476, (2013).

روش آماری آنالیز حساسیت سوبل، نسبت به آنالیز واریانس این برتری را دارد که علاوه بر مشاهده‌ی تأثیر کیفی پارامترهای ورودی بر پارامتر خروجی، می‌توان تأثیر کمی و دقیق این پارامترها را به‌طور هم‌زمان به دست آورده و پارامترهای مهم با تأثیرگذاری بالا و پارامترهای کم اثر را به‌طور دقیق شناسایی نمود. همچنین در نمودارهای مربوط به این روش می‌توان هم‌زمان نتیجه را به‌صورت گرافیکی مشاهده نمود. شکل (۱۰) نتایج کلی روش آنالیز حساسیت سوبل را در برمی‌گیرد. در این شکل مشاهده می‌گردد که از بین چهار پارامتر ورودی مورد بررسی، پارامتر ولتاژ با ۶۱ درصد اثرگذاری، حساس‌ترین پارامتر مؤثر بر نرخ براده‌برداری و پارامتر سرعت تغذیه سیم با ۴۴ درصد اثرگذاری، حساس‌ترین پارامتر مؤثر بر زبری سطح می‌باشد. همچنین نتایج نهایی آنالیز حساسیت نشان می‌دهد که از بین چهار پارامتر ورودی مورد بررسی، پارامتر غلظت الکترولیت با ۸ درصد اثرگذاری، پارامتر غیرحساس در نرخ براده‌برداری و پارامتر ضخامت قطعه‌کار با ۶ درصد اثرگذاری، پارامتر غیرحساس در زبری سطح می‌باشد. نتایج این شکل که از نرم‌افزار سیمبل و به روش آنالیز حساسیت آماری سوبل، استخراج شده است، با توجه به شکل‌های (۲) تا (۹) و میزان شیب خطوط آن‌ها نیز قابل تأیید می‌باشد.



شکل ۱۰ نتایج کلی روش آنالیز حساسیت

- [13] Mohitkar, A. D., Rattan, N., and Mulik, R. S., Improvement in Machining Performances of SiC Workpiece Using TW-Electro Chemical Spark Machining, *Silicon*, Vol. 14, No. 4, pp. 1369-1379, (2022).
- [14] Safikhani, H., Taheri, M., and Usefi, M., Sensitivity analysis of the effective nanofluid parameters flowing in flat tubes using the EFAST method, *Challenges in Nano and Micro Scale Science and Technology*, Vol. 7, No.2, pp. 80-87, (2019).
- [15] Khorshidi, K., Taheri, M., and Ghasemi, M., Sensitivity Analysis of Vibrating Laminated Composite Rec-tangular Plates in Interaction with Inviscid Fluid Using EFAST Method, *Mechanics of Advanced Composite Structures*, Vol. 7, No. 2, pp. 219-231, (2020).
- [16] Taheri, M., and Bathaee, S. H., Investigating machining factors of recovery powder metallurgy parts, from filings and sintered by Design of experiments in conjunction with sensitivity analysis, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 7, No. 7, pp. 24-37, (2020).
- [17] Mostafavi, S. A., and Taheri, M., Effect of geometrical parameters on thermal efficiency and fuel consumption of heaters of a natural gas pressure reduction station using Sobol statistical sensitivity analysis, *Heat Transfer*, Vol. 50, No. 2, pp. 1254-1267, (2021).
- [18] Saltelli A., and Sobol, I. M., About the use of rank transformation in sensitivity analysis of model output, *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 50, pp. 225-239, (1995).
- [6] Manna, A., and Kundal, A., An experimental investigation on fabricated TW-ECSM setup during micro slicing of nonconductive ceramic, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 76, No. 1, pp. 29-37, (2015).
- [7] Malik, A., and Manna, A., Travelling wire electrochemical spark machining: an overview, *Non-traditional Micromachining Processes*, pp. 393-411, (2017).
- [8] Rattan, N., and Mulik, R. S., Experimental set up to improve machining performance of silicon dioxide (quartz) in magnetic field assisted TW-ECSM process, *Silicon*, Vol. 10, No. 6, pp. 2783-2791, (2018).
- [9] Wu, X., Study of removing the recast layer by electrochemical dissolution with wire low feedrate in WEDM, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 105, No. 1, pp. 1143-1156, (2019).
- [10] Yadav, P., Yadava, V., and Narayan, A., Experimental investigation for performance study of wire electrochemical spark cutting of silica epoxy nanocomposites, *Silicon*, Vol. 12, No. 5, pp. 1023-1033, (2020).
- [11] Bhuyan, B. K., Bhuyan, P., and Mishra, S., Modeling and response optimization of traveling wire electro-chemical spark machining of borosilicate glass using hybrid approach, *Journal of Advanced Manufacturing Systems*, Vol. 19, No. 3, pp. 425-447, (2020).
- [12] Kumar, M., Vaishya, R. O., Suri, N. M., and Gupta, A., Parametric optimization of traveling wire electrochemical discharge machining (TW-ECDM) process for aspect ratio during machining of borosilicate glass, *Materials Today: Proceedings*, (2022).



ISME

نشریه مهندسی مکانیک
نشریه علمی انجمن مهندسان مکانیک ایران

دوره ۳۱، شماره ۵، شماره پیاپی ۱۴۶، آذر و دی ۱۴۰۱، صفحه ۱۹-۱۲
ISSN: 1605-9719

DOI: 10.30506/MMEP.2023.561084.2042

DOR: 20.1001.1.16059719.1401.31.5.2.7

سیستم توزین یک کیلوگرم با جبران ساز نیروی الکترومغناطیسی

چکیده: در این مقاله یک سیستم توزین با عملگر جبران ساز نیروی الکترومغناطیسی معرفی شده است. این سیستم‌ها در صنعت و به خصوص صنایع آزمایشگاه محور کاربردهای فراوانی دارند. مزیت استفاده از این سنسورها نسبت به سنسورهای مبتنی بر کرنش سنج‌ها، داشتن زمان پاسخ کوتاه‌تر می‌باشد. همین خاصیت این سنسورها باعث شده است که استفاده از آنها در توزین دینامیکی مناسب باشند. علاوه بر این، سیستم‌های توزین با جبران ساز نیروی الکترومغناطیسی در اندازه‌گیری مستقل از بخش الاستیک عمل می‌کنند. این امر باعث حذف اثراتی مانند خستگی ساختار الاستیک، در اندازه‌گیری می‌گردد. سیستم توزین پیشنهادی بر پایه ساختار دو اهرم طراحی شده و دارای ۳ بخش مکانیکی، الکتریکی و الکترومغناطیسی می‌باشد. این سیستم توانایی اندازه‌گیری وزن تا یک کیلوگرم با دقت یک گرم را دارد. در این سیستم از لولای خمشی برگی استفاده شده است که حساسیت سیستم را نسبت به لولای خمشی نوع هزلولی و نوع دایره‌ای بترتیب ۵ و ۲ برابر افزایش داده است. بخش مکانیکی سیستم از آلیاژ فولاد فتر بصورت یکپارچه ساخته شده است و جبران ساز الکترومغناطیسی شامل یک سیم‌پیچ با هسته فریت می‌باشد و جابجایی شاخص از طریق یک سوییچ نوری قابل شناسایی می‌باشد.

واژه‌های راهنما: سیستم توزین EMFR، لودسل، لولای خمشی، کرنش سنج، سنسور نوری، جبران ساز الکترومغناطیسی

احسان وکیلی

دانشجوی کارشناسی ارشد
مکانیک، دانشکده مهندسی
مکانیک، دانشگاه صنعتی ارومیه،
ارومیه

* مسعود تیموری

استادیار،
دانشکده مهندسی برق،
دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه

صابر عزیزی

دانشیار،
دانشکده مهندسی مکانیک،
دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه

مقاله ترویجی

دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۰۶

پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۱۴

Ehsan Vakili

M.Sc. Student of
Mechatronic,
Mechanical Engineering
Department, Urmia
University of
Technology, Urmia

Masood

Teymouri*

Assistant Professor,
Faculty of Electrical
Engineering, Urmia
University of
Technology, Urmia

Saber Azizi

Associate professor,
Mechanical Engineering
Department, Urmia
University of
Technology, Urmia

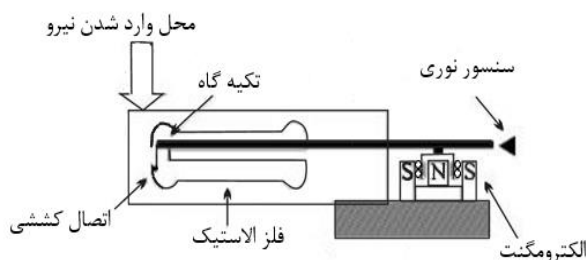
1Kg weighing system with an electro-magnetic force restoration

Abstract: In this paper, a weighing system with an electromagnetic force restoration is introduced. The systems are widely used in industry and especially in research laboratories. These sensors have a shorter response time compared to the strain gauge load cells. This feature of the sensors has made it suitable for dynamic weighing. In addition, EMFR systems operate independently of the elastic component in measurement. This feature eliminates effects such as fatigue of the elastic structure in the measurement. The proposed weighing system is designed based on the structure of two levers and has 3 mechanical, electrical, and electromagnetic parts. The measuring capacity of the proposed weighing system is 1 kg and its accuracy is 1 gr. In this system, a leaf flexure hinge has been used, which has increased the sensitivity of the system by 5 and 2 times compared to the hyperbolic type and circular type flexure hinges, respectively. The mechanical part of the system is integrally made of steel alloy, and the electromagnetic compensator consists of a coil with a ferrite core and the displacement can be detected through an optical switch.

Keywords: EMFR weighing system, Load cell, Bending hinge, Strain gauge, Optical sensor, Electromagnetic compensator

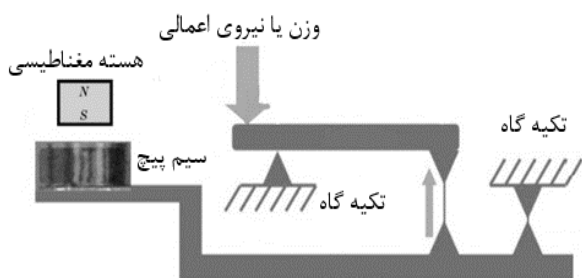
۱- مقدمه

در سال ۲۰۰۰ شرکت A&D ژاپن یک ترازوی سوپر هیبریدی با ترکیب سیستم EMFR با لودسل‌های معمولی تولید نمود. هدف آن‌ها افزایش دقت و توان اندازه‌گیری با ویژگی سیستم EMFR و همچنین کاهش ابعاد لودسل با استفاده از قسمت الاستیک لودسل‌های استرین گیج بود که در شکل (۲) نمای کلی نشان داده شده است [۷].



شکل ۲ سیستم توزین پیشنهادی شرکت A&D [۷]

در سال ۲۰۱۵ شرکت AND ژاپنی روشی را برای افزایش بار و ریزنگری لودسل‌های EMFR ارائه کرده است که قابلیت تحمل وزن تا ۳۰ کیلوگرم و رزولوشن بالایی دارد. سیستم پیشنهادی شرکت AND در شکل (۳) نشان داده شده است [۸].

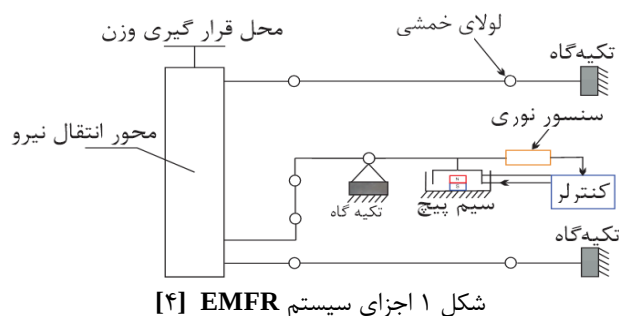


شکل ۳ مدل ارائه شده توسط شرکت AND در سال ۲۰۱۵ [۸]

در سال ۲۰۲۰، لی و همکاران یک مدل جدیدی با استفاده از آمپلی فایر نوع لوزی برای بهبود حساسیت سیستم-های EMFR ارائه کردند که مدل پیشنهادی در شکل (۴) نشان داده شده است [۴].

همان طور که در شکل (۴) مشخص است از یک تقویت کننده جابه‌جایی یا آمپلی فایر لوزی به جای اهرم استفاده شده است. آزمایشات تحلیلی و عملی آن‌ها نشان می‌دهد که استفاده از آمپلی فایر، دقت و ریزنگری سیستم را نسبت به سازه‌های اهرمی افزایش می‌دهد. آنطور که اشاره شده است حساسیت و ریزنگری سیستم پیشنهادی ارتباط مستقیم با وضوح و دقت سیستم الکترومغناطیسی و سنسور نوری داشته و با بهبود آن‌ها دقت و ریزنگری کل سیستم افزایش یافته است.

سیستم‌های توزین^۱ یا همان سیستم‌های اندازه‌گیری وزن کاربردهای بسیار فراوانی در زندگی بشری دارند. این سیستم‌ها به وفور در صنعت، آزمایشگاه‌ها، فروشگاه‌ها و غیره مورد استفاده قرار می‌گیرند. به دلیل نیاز بالا به این تجهیزات اندازه‌گیری، بازار بسیار بزرگی را نیز در سطح جهان دارند. به همین منظور سیستم‌های توزین با دقت، صحت و اعتماد پذیری بالا از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هستند و بهبود کارایی این نوع از سیستم‌ها می‌تواند یکی از زمینه‌های مهم تحقیق در حوزه میکاترونیک باشد. سیستم‌های توزین^۲ EMFR یا همان سیستم‌های جبران ساز نیروی الکترومغناطیسی یکی از جدیدترین نوع سیستم‌های اندازه‌گیری وزن با دقت و سرعت بالا هستند. سیستم EMFR برای اولین بار توسط شرکت آلمانی متلر^۳ برای استفاده در ترازوهای دقیق معرفی شد [۱-۲]. از ویژگی‌های مهم این سیستم‌ها می‌توان به دقت بالا، مقاومت بالا نسبت به بار ضربه‌ای و همچنین زمان پاسخ‌دهی کوتاه اشاره نمود. همین ویژگی‌ها باعث شده است که از سیستم‌های توزین EMFR در تجهیزات اندازه‌گیری ابزار دقیق و همچنین توزین دینامیکی شامل توزین مواد و مصالح موجود روی نوار نقاله‌ها و همچنین صنایع حمل بار استفاده گردد. بلوک دیاگرام کلی یک سیستم EMFR در شکل (۱) نشان داده شده است [۳].



شکل ۱ اجزای سیستم EMFR [۴]

یک سیستم توزین EMFR شامل اهرم‌ها، سیم‌پیچ الکترومغناطیسی و یک سنسور تشخیص جابه‌جایی می‌باشد. با قرار دادن وزنه بر روی کفه، مکانیزم از حالت تعادل خارج شده و می‌توان با تحریک سیم‌پیچ و تولید نیروی الکترومغناطیسی دوباره مکانیزم را به حالت تعادل اولیه برگرداند. در نهایت می‌توان از طریق میزان ولتاژ و یا جریان مصرفی سیم‌پیچ، اندازه وزن اعمالی به کفه را محاسبه نمود [۵-۶].

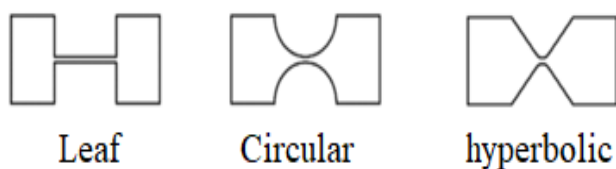
³ METTLER

¹ Weighing systems

² Electro-magnetic force restoration

برای کاهش مقدار نیروی وارد بر سمت دیگر اهرم که منجر به کاهش توان مصرفی سیم پیچ مغناطیسی می گردد. از سیستم های ۲ یا ۳ اهرم بهره می گیرند. البته سیستم های تک اهرم نیز وجود دارند که نسبت به سیستم های چند اهرم پیچیدگی کمتری دارند. سیستم های ۳ اهرم امکان توزین وزن های بالا با کمترین توان مصرفی را فراهم می نمایند. ولی سیستم های دو اهرم نیز مزیت هایی مانند سادگی ساخت و همچنین کاهش محاسبات و خطا به علت استفاده کمتر از اتصالات نسبت به سیستم های ۳ اهرم را دارند [۳].

در سال های اولیه تولید سیستم های توزین EMFR قطعات به صورت منفک تولید و سپس مونتاژ می شدند. با توسعه ماشین های ابزار ساخت، به منظور بالا بردن دقت اندازه گیری با کاهش دادن خطای ناشی از لقی بین قطعات مونتاژی، اولین بلوک یکپارچه سیستم های توزین EMFR در سال ۲۰۰۲ تولید گردید. نکته بسیار مهم و حائز اهمیت در این مکانیزم ها استفاده از لولاهای خمشی^۱ می باشد. لولاهای خمشی اجزا قابل انعطافی هستند که به جای لولاهای معمولی در مکانیزم های مکترونیک و میکروماشین کاربرد دارند. از انواع لولاهای خمشی می توان به نوع برگی^۲، دایره ای^۳ و هذلولی^۴ اشاره نمود که در شکل (۵) قابل مشاهده می باشند.

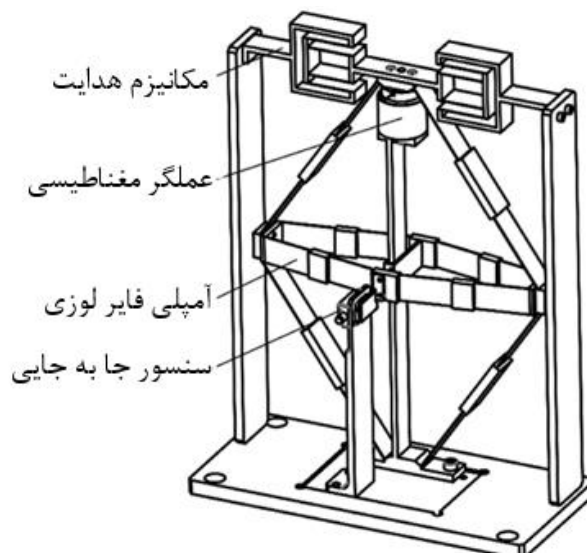


شکل ۵ انواع مهم لولاهای خمشی [۱۱]

ساده ترین روش تحلیل لولاهای خمشی استفاده از روابط تیر اوپلر- برنولی می باشد. با توجه به شکل (۶)، در این روش فرض می شود یک لولای خمشی مانند یک تیر سرگردار است که به سر آزاد آن گشتاور خمشی M وارد می شود. روابط ۲ و ۳ به ترتیب زاویه جابجایی و مقدار جابه جایی در محور y را نشان می دهد [۴ و ۱۰].

$$\theta = \frac{ML}{EI} \quad (2)$$

$$\Delta y = \frac{ML^2}{2EI} \quad (3)$$



شکل ۴ مدل ارائه شده توسط لی و همکاران [۴]

در این مقاله یک سیستم توزین مبتنی بر EMFR ارائه شده است که بخش های مختلف مقاله به این شرح می باشد. بخش (۲)، عملکرد سیستم توزین EMFR را توضیح می دهد. در بخش (۳) یک سیستم EMFR جدید و نحوه ساخت آن ارائه شده است. در بخش (۴) نتایج تست سیستم پیشنهادی بیان گردیده است و در نهایت یک نتیجه گیری کلی در بخش نهایی بیان شده است.

۲- سیستم های توزین EMFR

همان طور که در بخش (۱) اشاره شد با اعمال وزنه به کفه سیستم EMFR شکل (۱)، شاخص جابجا شده و با اعمال نیروی الکترومغناطیسی به حالت تعادل اولیه بر می گردد. رسیدن شاخص به حالت اولیه توسط سنسور جابجایی قابل تشخیص می باشد. در حالت تعادل، نیروی اعمالی از طریق وزنه به کفه با نیروی الکترومغناطیسی سیم پیچ برابر می باشد و چون نیروی الکترومغناطیسی با جریان سیم پیچ طبق رابطه شماره ۱، ارتباط مستقیم دارد لذا با اندازه گیری این جریان می توان میزان نیروی اعمالی به کفه یا به عبارتی دیگر وزن را اندازه گیری نمود.

$$F_e = \frac{k\mu_0 N^2 I^2 A}{2L^2} \quad (1)$$

در این رابطه $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ ، I شدت جریان الکتریکی، N تعداد دور سیم پیچ، A سطح مقطع هسته، L طول سیم پیچ و k ثابت تراوایی مغناطیسی هسته می باشد [۹].

³ Circular
⁴ hyperbolic

¹ Flexure Hinges
² Leaf

از ۲ لولای خمشی نوع Leaf و یک کوپلینگ به همراه پایه نگهدارنده سوییچ نوری تشکیل شده است. خود کوپلینگ نیز شامل ۲ لولای خمشی و یک قسمت صلب می باشد. مدل دیاگرام آزاد مربوط به سیستم ساخته شده در شکل (۸) نشان داده شده است [۱۱].

با توجه به شکل (۸) و محاسبه گشتاور حول نقطه A خواهیم داشت:

$$F' = F_1 \cdot \frac{a}{b} \quad (۴)$$

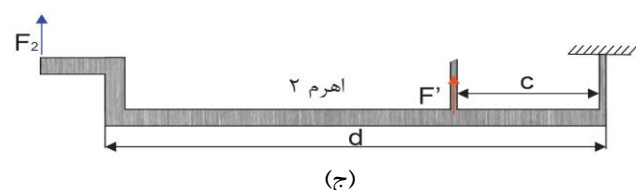
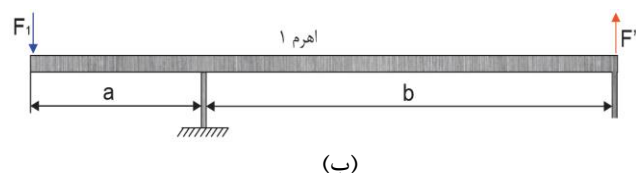
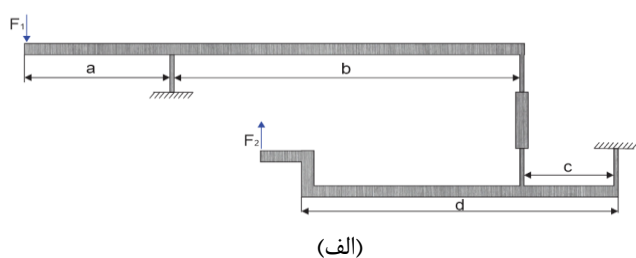
از طرف دیگر با محاسبه گشتاور حول نقطه D خواهیم داشت:

$$F_2 = F' \cdot \frac{c}{d} \quad (۵)$$

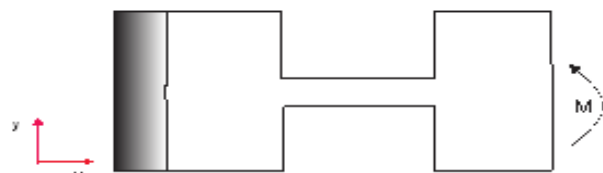
با مقایسه روابط ۴ و ۵ رابطه زیر بدست می آید.

$$F_2 = F_1 \cdot \frac{a}{b} \cdot \frac{c}{d} \quad (۶)$$

این رابطه نشان می دهد می توان از طریق طول لولاهای و بازوها یک تناسب مناسبی بین نیروی اعمالی به کفه و نیروی اعمالی از طریق سیم پیچ ایجاد کرد در مکانیزم طراحی شده با انتخاب $a=25\text{mm}$, $b=66\text{mm}$, $c=16\text{mm}$ و $d=55\text{mm}$ بین این دو نیرو $F_2=0.11 \times F_1$ می شود که این نشان می دهد برای جبران سازی جابجایی به خاطر اعمال نیرو به کفه کافیست ۰.۱۱ برابر نیروی کمتر از طریق سیستم الکترومغناطیسی اعمال گردد.



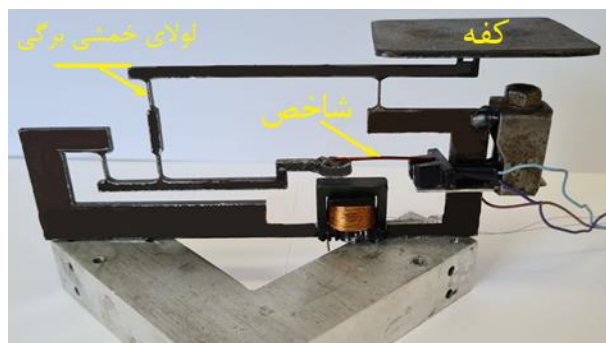
شکل ۸ دیاگرام آزاد (الف) سیستم توزین (ب) اهرم ۱ (ج) اهرم ۲



شکل ۶ محل اعمال گشتاور در لولای خمشی Leaf

۳- سیستم توزین پیشنهادی

سیستم پیشنهادی بر پایه ساختار دو اهرم طراحی و ساخته شده که تصویر آن در شکل (۷) نشان داده شده است. این سیستم دارای ۳ بخش مکانیکی، الکتریکی و الکترومغناطیسی می باشد. بخش مکانیکی از یک فولاد فتر با مدول الاستیسیته ۶۷۰ GPa با استفاده از دستگاه برش CNC به صورت یکپارچه ساخته شده است. جبران سازی الکترومغناطیسی از یک سیم پیچ با هسته فریت ساخته شده و جابجایی شاخص از طریق یک سوییچ نوری قابل شناسایی می باشد.

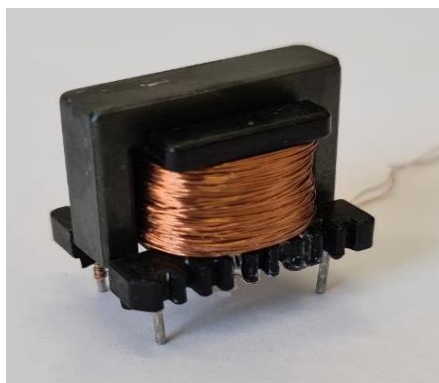


شکل ۷ سیستم توزین ساخته شده

مهم ترین مزیت این سیستم استفاده از ترکیب دو اهرم و همچنین لولای خمشی نوع برگی در آن است. که حساسیت سیستم را افزایش داده است. لولاهای خمشی برگی علاوه بر محاسبات ساده، فرآیند ساخت را نیز آسان تر می کنند. البته استفاده از لولای خمشی برگی با وجود اینکه حساسیت را بهبود می بخشد اما برای توزین بارها و وزن های سنگین محدودیت ایجاد می نماید توضیحات کامل مربوط به هر قسمت در ادامه بیان شده است.

۳-۱- بخش مکانیکی

همانطور که از تصویر شکل (۷) قابل مشاهده است، اعمال وزنه به کفه باعث جابجایی شاخص می شود. در واقع بخش مکانیکی به عنوان یک مکانیزم مبدل وزن به جابه عمل می کند. این سیستم



شکل ۱۰ سیم پیچ الکترومغناطیسی

برای کنترل میزان ولتاژ اعمالی به سیم پیچ از یک منبع تغذیه قابل تنظیم با ولتاژ مستقیم استفاده شده است. بطوریکه بعد از اعمال وزن به کفه، ولتاژ منبع از حداقل صفر ولت با گام‌های بسیار کم در حد دهم ولت اضافه گردید تا زمانیکه نیروی الکترومغناطیسی شروع به جابجایی اهرم دوم نماید در این حالت با گام‌های میلی ولت، ولتاژ خروجی منبع تغذیه افزایش یافت تا زمانیکه انتهای اهرم دوم با شاخص در یک راستا قرار گیرد. در این حالت همانطور که در بخش (۲-۳) توضیح داده شده است خروجی سوییچ نوری تغییر یافته و ولتاژ اعمالی به سیم پیچ در آن وضعیت به عنوان ولتاژ اعمالی به سیم پیچ برای آن وزن یادداشت شده است.

۴- تست و تحلیل نتایج

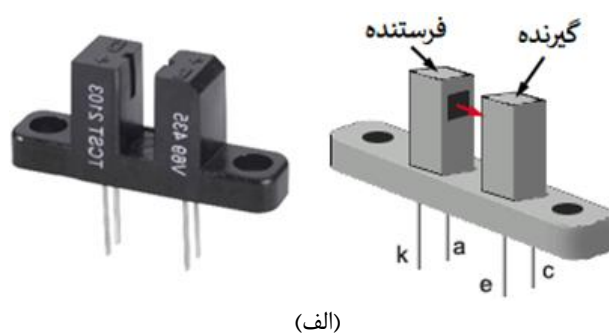
جهت بررسی رابطه میزان جابه‌جایی شاخص با نیروی ورودی، یک ساعت اندیکاتور یک میکرومتری همانند شکل (۱۱) به سیستم توزین متصل گردید. پس از نصب سازه و قرار دادن آن بر روی یک صفحه صافی، وزنه‌های استاندارد با ۵ بار تکرار بر روی ابتدای اهرم اولیه (کفه) قرار داده شد و میزان جابجایی ثبت گردید نتیجه حاصله در جدول (۱) و منحنی مربوطه در شکل (۱۲) قابل مشاهده می‌باشد.



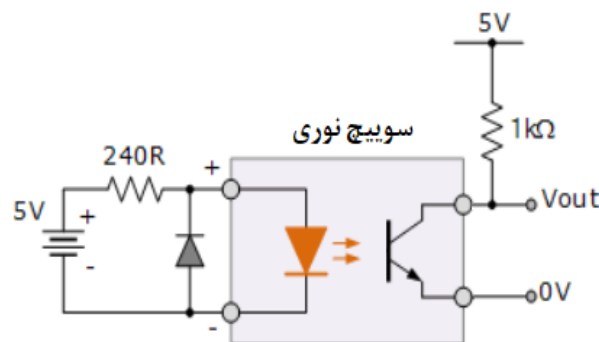
شکل ۱۱ اندازه‌گیری میزان جابه‌جایی با ساعت اندیکاتور

۳-۲- بخش الکتریکی

از یک سوییچ نوری که تصویر آن در شکل (۹) نشان داده شده است برای تشخیص جابه‌جایی استفاده شده است. سوییچ مربوطه به گونه‌ای نصب شده است که شاخص (انتهای اهرم دوم) در شرایط بدون اعمال وزن، دقیقاً در مقابل شیار نوری سوییچ قرار می‌گیرد و به این طریق ارسال نور از فرستنده آن به گیرنده اش را مسدود می‌کند. در این شرایط خروجی ولتاژ سوییچ ۵V بوده و یا به عبارتی دیگر 1 دیجیتال می‌باشد حال در اثر اعمال وزن به کفه و به طبع آن جابجایی شاخص از داخل سوییچ، نور ارسالی فرستنده به گیرنده رسیده و ولتاژ خروجی سوییچ 0V و یا همان 0 دیجیتال می‌شود. واضح است که بعد از برگرداندن شاخص از طریق نیروی الکترومغناطیسی به محل اولیه خود، مجدداً نور بین فرستنده و گیرنده سوییچ قطع شده و خروجی سنسور مجدداً 1 دیجیتال می‌شود که از این طریق می‌توان دقیقاً متوجه شد که شاخص به محل اولیه خودش رسیده است.



(الف)



(ب)

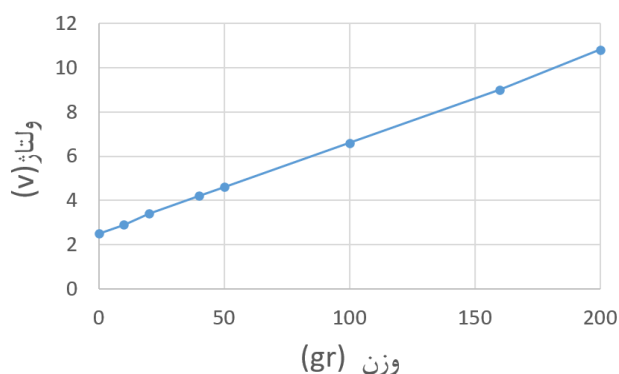
شکل ۹ (الف) سوییچ نوری (ب) مدار راه انداز

۳-۳- بخش الکترومغناطیسی

این بخش از سیستم شامل یک سیم‌پیچ مغناطیسی (شکل ۹) می‌باشد که وظیفه اعمال نیرو به انتهای اهرم دوم را دارد تا شاخص را به محل اولیه خود برگرداند.

جدول ۲ نتایج حاصل از آزمون در حالت Close – Loop

نسبت ولتاژ ورودی به وزن	
ولتاژ (v)	وزن (gr)
۲/۵	۰
۲/۹	۱۰
۳/۴	۲۰
۴/۲	۴۰
۴/۶	۵۰
۶/۶	۱۰۰
۹	۱۶۰
۱۰/۸	۲۰۰



شکل ۱۳ نسبت ولتاژ ورودی و وزن

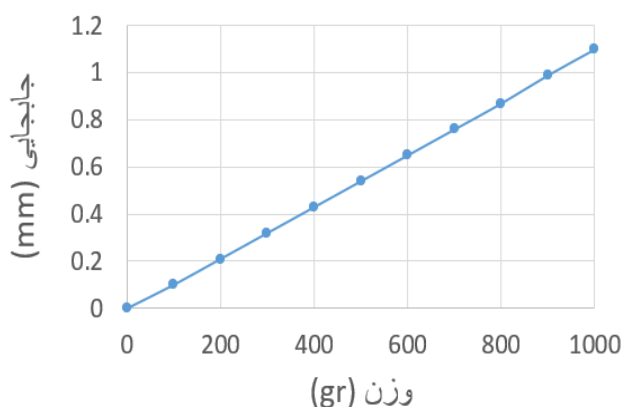
همانند حالت قبلی حاکی از یک رابطه خطی بین وزن اعمالی و ولتاژ اعمالی به سیم پیچ می باشد. این سیستم توزین قادر است وزن تا 1kg با دقت 1g را بخوبی اندازه گیری نماید. آزمون های اندازه گیری با استفاده از وزنه های استاندارد کلاس F1 انجام گرفت. که مطابق استاندارد OIML R111-1 خطای آن ها به شرح جدول (۳) می باشد.

وزن نامی (گرم)	میزان خطا (میلی گرم)
۱۰۰۰	۵
۵۰۰	۲/۵
۲۰۰	۱
۱۰۰	۰/۵
۵۰	۰/۳
۲۰	۰/۲۵
۱۰	۰/۲

جدول ۳ میزان خطای وزنه های کلاس F1

جدول ۱ داده های حاصل از آزمایش در حالت Open-Loop

داده های نسبت جا به جایی به وزن در حالت Open-Loop	
وزن (گرم)	جا به جایی (میلی متر)
۰	۰
۱۰۰	۰/۱
۲۰۰	۰/۲۱
۳۰۰	۰/۳۲
۴۰۰	۰/۴۳
۵۰۰	۰/۵۴
۶۰۰	۰/۶۵
۷۰۰	۰/۷۶
۸۰۰	۰/۸۷
۹۰۰	۰/۹۹
۱۰۰۰	۱/۱



شکل ۱۲ نسبت جا به جایی به وزن

همانطور که قابل استنتاج است یک ارتباط خطی بین جابجایی و وزن اعمالی وجود دارد که رابطه آن عبارت است از

$$\Delta x \approx 0.1 \times F \quad (۷)$$

پس از ارزیابی عملکرد مکانیزم، سنسور نوری و جبران ساز نیروی الکترومغناطیسی بر روی سازه نصب گردید و همانند روش قبلی وزنه های استاندارد بر روی کفه قرار داده شد. با قرار دادن هر وزنه، شاخص مقداری جابجا می شد و در ادامه جریان الکتریکی به سیم پیچ اعمال می گردید تا دوباره شاخص به محل اولیه خود بر گردد. هنگام رسیدن شاخص به محل اصلی، ولتاژ مربوطه ثبت گردید که داده ها و نتایج در جدول (۲) و منحنی بین وزن و ولتاژ در شکل (۱۳) نشان داده شده است.

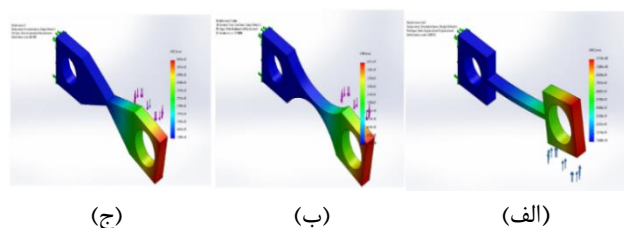
همچنین رزولوشن سیستم نوری و مغناطیسی دارد. در این مقاله یک سیستم توزین دو اهرم معرفی گردید که از فولاد فتر ساخته شده بود و از طریق یک سیم پیچ الکترومغناطیسی با هسته فرومغناطیسی جبران سازی شده و توسط یک سویچ نوری جابجایی آن بدست آمد. نتایج تست آزمایشگاهی نشان داد این سیستم توزین با دقت 1g قادر است وزنه های تا 1kg را اندازه گیری نماید و مشاهده شد رابطه بین ولتاژ مگنت با وزن اعمالی به کفه یک رابطه کاملاً خطی می باشد.

۶- مراجع

- [1] Büttner, J., Renn, J., Schemmel, J., The early history of weighing technology from the perspective of a theory of innovation, emergence and expansion of preclassical mechanics, *Boston Studies in the Philosophy and History of Science*, Vol. 270, Springer, (2018).
- [2] Kamble, V., shinde, V., Kittur, J., Overview of load cells, *mechanical and mechanics engineering*, Vol. 6, Issue 3, (2020).
- [3] Emery, J., A sub-ppm precision monolithic force sensor based on articulated structures with flexible bearings, *Sensors Expo & Conference*, pp. 1-12, (2001).
- [4] Li, Y., Zhu, X., Bi, S., Guo, R., Sun, J., Hu, W., Design and development of compliant mechanisms for electromagnetic force balance sensor, *Precision Engineering*, Vol. 64, pp. 157-164, (2020).
- [5] Stefanescu, M., Application of electromagnetic methods in force sensing, with emphasis on micro, nano and pico ranges, *Journal of Physics: Conf. Series*, Vol. 1065, (2018).
- [6] Abdullah, Ahn, J., Kim, H., Effect of electromagnetic damping on system performance of voice-coil actuator applied to balancing-type scale, *Actuators*, Vol. 9, Issue 1, pp. 1-23, (2020).
- [7] Izumo, N., Nagane, Y., SUPER-hybrid-sensor for new balances, *APMF2000*, (2000).
- [8] Application Note: Bringing Smarter Technology to Weighing with the Smart Super Hybrid Sensor, <https://andprecision.com>, (2019).
- [9] Purcell, E., Morin, D., *Electricity and Magnetism*, Cambridge University Press, 3rd Edition, (2013).
- [10] Dong, W., Chen, F., Gao, F., Yang, M., Sun, L., Du, Z., Tang, J., Zhang, D., Development and analysis of a bridge-lever-type displacement amplifier based on

از طرفی میزان خطای ساعت اندازه گیری 0.01%FS توسط سازنده در شرایط آزمایشگاهی اعلام شده بود. همچنین میزان خطای مولتی متر نیز به صورت 0.1%F.S می باشد. آزمایش در شرایط آزمایشگاهی در در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد و ۴۴ درصد رطوبت انجام گرفت. مهم ترین عامل موثر شرایط محیطی دما می باشد. دما باعث تغییر مدول الاستیسته فلزات می گردد. از آنجاییکه آلیاژ بخش مکانیکی با ضریب انبساط حرارتی $2/5 \text{ m/mk}\mu$ می باشد. ضریب انبساط حرارتی پایین باعث شده است که تغییرات چندانی در مدول الاستیسته در اثر تغییر شرایط محیطی کاری به وجود نیاید. بطوریکه شبیه سازی در دماهای ۵، ۲۵ و ۴۵ درجه سانتیگراد تفاوت محسوسی را نشان نداد.

حساسیت سیستم پیشنهادی بر پایه آزمایشات عملی توسط رابطه (۱) بیان شده است. اما برای مقایسه حساسیت سیستم پیشنهادی با کارهای رایج که از لولاهای دیگر مانند دایره ای و هذلولی برای ساخت بخش مکانیکی استفاده کرده اند از تحلیل کامپیوتری با استفاده از نرم افزار Solid Works (شکل ۱۴) استفاده شد.



شکل ۱۴ لولا خمشی الف) برگی ب) دایره ای ج) هذلولی

شبیه سازی کامپیوتری با اعمال نیروی ۰/۰۱ تا ۱۰ نیوتن برای ۳ نمونه برگی، دایره ای و هذلولی انجام گرفت و نتایج شبیه سازی نشان داد در اثر اعمال نیرو، مقدار جابه جایی سیستم پیشنهادی نسبت به جابه جایی سیستم های رایج که از نوع هذلولی و دایره ای استفاده می کنند بترتیب ۵ و ۲ برابر می باشد. که این نشان می دهد سیستم پیشنهادی در شرایط مساوی نسبت به کارهای رایج می تواند رزولوشن بالایی داشته باشد.

۵- نتیجه گیری

سیستم های EMFR به علت داشتن زمان پاسخ کوتاه تر نسبت به لودسل های استرین گیج برای توزین دینامیکی و همچنین توزین دستگاه های با دقت بالا مناسب تر هستند. دقت این سیستم ها رابطه مستقیم با لولاهای خمشی مورد استفاده و

[11] Xu, N., Dai, M., Zhou, X., Analysis and design of symmetric notch flexure hinges, *Advances in Mechanical Engineering*, Vol. 9, (2017).

hybrid flexure hinges, *Precision Engineering*, Vol. 54, pp. 171-181, (2018).

ارزیابی غیرمخرب آسیب کامپوزیت ها با آزمون آکوستیک امیشن

چکیده: با توجه به نیازهای در حوزه فناوری های مختلف مکانیک و هوافضا، کاربردهای کامپوزیت های تقویت شده و مواد جامد ناهمگن به طور گسترده ای توسعه یافته اند. در این تحقیق به ضرورت استفاده از روش های غیر مخرب در شناسایی آسیب های احتمالی اشاره می شود. علاوه بر این روش آکوستیک امیشن شرح و تفاوت آن با سایر روش های ارزیابی غیر مخرب مقایسه شده است. بیان می شود که آکوستیک امیشن یک روش تشخیص دینامیک است و می تواند به صورت آنی ناپیوستگی ها را در یک سازه تحت کشش نشان دهد. ماهیت سیگنال های آکوستیک امیشن به عنوان سیگنال الکتریکی ذکر شده است. در انتها بهترین روش جهت بررسی نقص های تورقی و خرابی الیاف روش آکوستیک امیشن معرفی می گردد. این مقاله قابلیت های متداول و نوظهور ارزیابی غیر مخرب را با استفاده از آزمون آکوستیک امیشن برای تشخیص آسیب در مواد کامپوزیت بررسی می کند.

واژه های راهنما: آکوستیک امیشن، ارزیابی غیرمخرب، کامپوزیت، تورق، چندلایه

رضا فلک دین

دانشجوی کارشناسی ارشد

روح اله حسینی*

استادیار

محمد لطیفی

استادیار،

دانشگاه جامع امام حسین(ع)،
گروه مهندسی مکانیک، تهران

مقاله مروری

دریافت: ۱۴۰۱/۰۱/۰۴

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۲۳

R. Falakdin
MSc Student

R. Hosseini*
Assistant Professor

M. Latifi
Assistant Professor,
Department of
Mechanical Engineering,
Imam Hossein
Comprehensive
University,
Tehran

Non-destructive damage evaluation of composites with acoustic emission method

Abstract: The applications of reinforced composites and heterogeneous solid materials have been widely developed in different fields of aerospace and mechanical engineering. In this research, the necessity of using non-destructive methods in identifying possible damages in composite materials is pointed out. In addition, the acoustic emission method is described and compared with other non-destructive evaluation methods.

It is stated that acoustic emission is a dynamic diagnosis method which can instantly show discontinuities in a structure under tension. The nature of acoustic emission signals is mentioned as an electrical signal. Finally, it is concluded that the best method to check the delamination and fiber damage in composite laminates is the acoustic emission method.

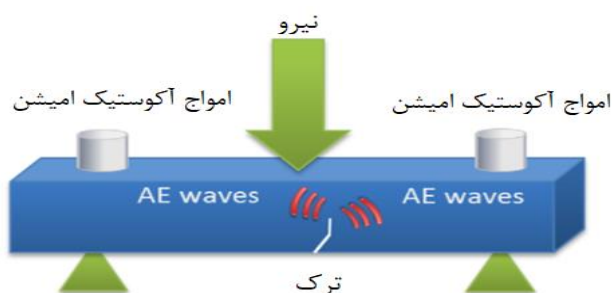
Keywords: Acoustic emission, Non-destructive evaluation method, Delamination, Laminate composite

۱- مقدمه

آسیب خستگی. این موارد به دلیل پیچیدگی آسیب خستگی در کامپوزیت ها، اهداف چالش برانگیزی هستند. تشخیص آسیب در کامپوزیت ها به بهبود روش های ارزیابی غیرمخرب قدیمی و همچنین توسعه انواع فناوریهای جدید ارزیابی غیر مخرب نیاز دارد. تمرکز اصلی این مقاله بررسی تواناییها و محدودیتهای روش آکوستیک امیشن برای شناسایی و توصیف آسیب خستگی در چندلایه ها و کامپوزیت های ساندویچ است. در ادامه شرحی از اصول عملیاتی روش آکوستیک امیشن و عوامل موثر بر آن ارائه خواهد شد.

۲- روش آکوستیک امیشن

وقتی که ماده ای جامد تحت تنش باشد، عیوب موجود در آن باعث ایجاد امواج صوتی با بسامد بالا می گردند. این امواج در ماده منتشر شده و می توان توسط حسگرهای خاصی آن ها را دریافت کرد و با تجزیه و تحلیل این امواج امکان شناسایی نوع عیب، مکان و شدت آن فراهم می گردد که این امر اساس روش آکوستیک امیشن را تشکیل می دهد [۴].



شکل ۱ ایجاد امواج الاستیک بر اثر تنش در ماده [۵]

آکوستیک امیشن یک روش غیرفعال^۵ است. در این روش ارزیابی غیرمخرب از طریق دریافت امواج الاستیک تولید شده در ماده و تحلیل آن ها به منظور برقراری ارتباط بین امواج دریافت شده و تغییرات ایجاد شده بر روی منبع انجام میگیرد. با توجه به انتشار امواج از منبع تا سطح ماده، می توان آن ها را توسط سنسورهای ثبت کرد و از این طریق اطلاعاتی در مورد وجود و محل منبع انتشار امواج به دست آورد. این امواج می توانند فرکانس هایی تا چند مگاهرتز داشته باشند. برای شنیدن صدای مواد و شکست سازه ها از سنسورهای فراصوت در محدوده ۲۰ کیلوهرتز تا ۱ مگاهرتز استفاده می شود. فرکانس های متداول در

مقاومت قابل ملاحظه ورقه های پلیمر تقویت شده با الیاف پیوسته در برابر خستگی در مقایسه با مواد مهندسی سنتی مانند فولادها و آلیاژهای آلومینیوم عامل مهمی در کاربرد گسترده کامپوزیت ها در سازه های سبک بوده است. عملکرد خستگی برجسته کامپوزیت ها منجر به استفاده از آنها در طیف گستردهای از اجزای سازنده شده است که باید چرخه بارهای شدید را برای مدت طولانی تحمل کنند. این قطعات شامل پروانه های هواپیما، بال ها، پره های چرخان هلیکوپتر، ماشین آلات چرخان، بدنه قایق های تفریحی، پروانه های قایق، قابه ای دوچرخه مسابقه و نظایر آن است. مقاومت در برابر خستگی زیاد نیز عاملی اساسی در استفاده از کامپوزیت ها در کاربردهای جدید مانند پروتزهای پزشکی شامل اندام مصنوعی و مفاصل ران و زانو همچنین اجزای خودرو مثل فنرهای تعلیق میباشد. ورقه های الیاف پیوسته معمولاً تحت بارگذاری سیکلیک^۶ درون صفحه بسیار مقاوم هستند، اگرچه آسیب میتواند در زیر بارهای خستگی زیاد درون صفحه و همچنین در زیر بارهای دینامیکی خارج از صفحه و ضخامت متوسط باشد. هنگامی که کامپوزیتها در معرض این شرایط بارگذاری خستگی قرار میگیرند، آسیب به اشکال ترک خوردگی ماتریس، جفت شدن ترک، شروع و رشد تورق (لایه لایه شدن)^۳ و شکستگی الیاف ایجاد میشود [۱]. علاوه بر این حالت های آسیب، اشکال دیگری از آسیب خستگی میتواند به مواد کامپوزیت ساندویچی وارد شود. از جمله آنها میتوان به اتصال پوسته و شکست هسته اشاره کرد. هر دو نوع از کامپوزیت های چندلایه^۴ و ساندویچ پنل هنگام قرار گرفتن در محیطی که دامنه وسیع و نوسانات سریع دما را تجربه میکنند، در معرض آسیب خستگی ناشی از حرارت نیز هستند [۲، ۳]. آسیب خستگی ناشی از تنش یا سیکل حرارتی میتواند یکپارچگی مکانیکی و ایمنی یک ساختار کامپوزیتی را به خطر بیندازد. بنابراین ضروری است که آسیب ایجاد شده با استفاده از فناوری های ارزیابی غیرمخرب^۵ رودهنگام شناسایی شود. هنگام استفاده از کامپوزیتها در کاربردهای ساختاری، ارزیابی غیر مخرب برای آسیب خستگی یک نیاز اساسی است. روند ارزیابی غیر مخرب باید دو هدف اساسی داشته باشد: ۱- توصیف قابل اعتماد و قابل تکرار از انواع، ابعاد و مکان های آسیب خستگی ۲- تعیین دقیق تغییرات در خصوصیات مکانیکی به عنوان مثال سختی ناشی از

⁵ (Non destructive evaluation) NDE

⁶ Acoustic emission

⁷ Passive

¹ FPR

² Cyclic

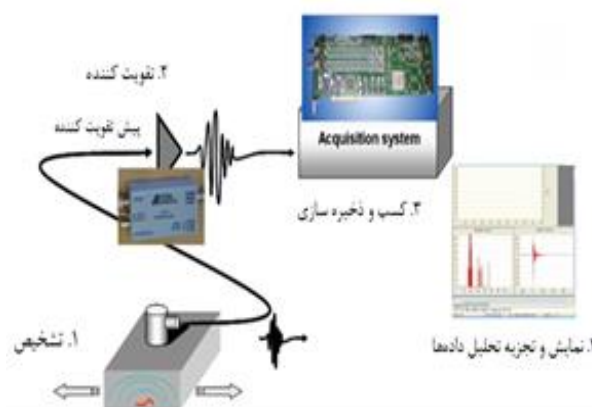
³ Delamination

⁴ Laminates

تشخیص امواج تنش با شدت کم است که در اثر وقوع خرابی ایجاد می‌شوند. برای نمونه میتوان به تورق و شکستگی الیاف اشاره کرد. امواج تنش از انرژی کرنشی که در طی یک خرابی آزاد میشود تشکیل میشوند و به سطوحی منتقل میشوند که توسط حسگرهای صوتی شناسایی میگردند. جذابیت روش آکوستیک امیشن، توانایی نظارت بر شروع و آسیب انباشته در زمان واقعی است که با اکثر سایر روش های ارزیابی غیر مخرب امکان پذیر نیست. از دیگر مزایای آکوستیک امیشن، توانایی تشخیص بین برخی از انواع آسیب و در صورت استفاده از تعدادی سنسور، تعیین محل وقایع خرابی است. از آکوستیک امیشن اغلب برای نظارت بر شکل‌گیری و رشد آسیب خستگی در کامپوزیت ها استفاده می شود [۷، ۸]. به طور کلی مشخص شده است که بازرسی از کامپوزیتها با استفاده از آکوستیک امیشن میتواند بینش ارزشمندی در مورد مکانیزم های خرابی ایجاد کند که در مراحل مختلف در طول عمر خستگی رخ می‌دهند و در نهایت منجر به خرابی میگردند. این به این دلیل است که مکانیزم های مختلف شکست خستگی سیگنال های مختلف آکوستیک امیشن را ایجاد می کنند. به عنوان مثال، چنگ و همکاران [۷] دریافتند که ترکهای ماتریس عرضی ناشی از بارگذاری خستگی کامپوزیت های کربن/ اپوکسی را می‌توان با تشخیص انتشارهای صوتی با دامنه بالا که دارای یک فرکانس مشخص است، شناسایی کرد. کلودیا و همکاران [۹] دریافتند که با استفاده از خصوصیات روش آکوستیک امیشن، شکست و رشد ترک بین لایه ای در سیگنال هایی با دامنه بالا با استفاده از این آزمون قابل تشخیص است. ونچون و همکاران [۱۰] دریافتند که رفتار و آسیب خمشی و تکامل آسیب مبتنی بر کرنش سه بعدی در کامپوزیت تقویت شده، با استفاده از آزمون آکوستیک امیشن قابل تشخیص است. بیونگ‌ووک جانگ و همکاران [۱۱] اطلاعات مفیدی در مورد وقایع و مکانهای ضربه کم سرعت، با سیستم بازرسی آکوستیک امیشن و روش مثلث‌بندی در فواصل مختلف سنسور و مکان ضربه در صفحه سفت‌شده با کامپوزیت بدست آوردند. میچال سوفرو همکاران [۱۲] در یافتند که شکست الیاف، تورق، گسیختگی و ترک‌خوردگی ماتریس با استفاده از آزمون آکوستیک امیشن قابل تشخیص است و شکست ترک ماتریس با استفاده از آزمون آکوستیک امیشن در سیگنال باند فرکانس بین ۵۰ تا ۲۰۰ کیلوهرتز در لوله های کامپوزیت الیاف کربن^۱ قابل ارزیابی می‌باشد. میلاد سعیدی‌فر و همکاران [۱۳] دریافتند که تشخیص آسیب، شناسایی آسیب و مکانیابی آسیب در

این روش در محدوده ۱۵۰ الی ۳۰۰ کیلوهرتز هستند. انتشار امواج تا سطح قطعه یعنی جایی که سنسورها نصب شده‌اند، ادامه می‌یابد و به وسیله سنسورها ثبت شده و به سیگنال‌های الکتریکی تبدیل می‌گردد. سیستم آکوستیک امیشن این سیگنال‌ها را پردازش می‌کند و آن‌ها را به بسته‌های اطلاعاتی تبدیل می‌کند. در نهایت اطلاعات آماری نظیر مشخصات و موقعیت منابع محاسبه شده و به‌صورت نمودارهای گرافیکی و عددی نمایش داده می‌شوند تا مورد تفسیر قرار گیرند.

کاربردهای روش آکوستیک امیشن تنها به ارزیابی غیر مخرب قطعات، تجهیزات و سیستم های مختلف محدود نمی‌شود؛ به‌علاوه می‌توان از آن برای تخمین عمر قطعات و تجهیزات بهره گرفت. هم‌چنین از این روش می‌توان برای آشکارسازی و مکان‌یابی تخلیه های جزئی ولتاژ در مبدل‌های بزرگ، تحقیق و بررسی خصوصیات و مشخصات مواد، زمین‌شناسی و تحقیق در مورد میکرو ارتعاش‌ها استفاده کرد.

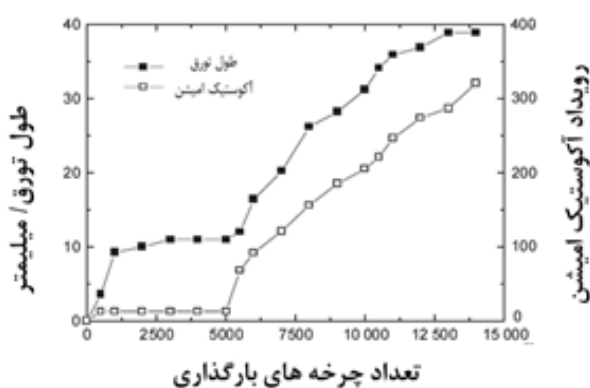


۳- آکوستیک امیشن در کامپوزیت ها

از آکوستیک امیشن میتوان به عنوان یک روش ارزیابی غیرمخرب موثر برای نظارت مستمر بر توسعه آسیب خستگی در کامپوزیت ها استفاده کرد. آسیب خستگی ناشی از تنش یا سیکل حرارتی میتواند یکپارچگی مکانیکی و ایمنی یک ساختار کامپوزیتی را به خطر بیندازد. بنابراین ضروری است که آسیب با استفاده از فناوری‌های ارزیابی غیرمخرب زود هنگام شناسایی شود. تشخیص آسیب در کامپوزیت ها به بهبود روش های ارزیابی غیرمخرب قدیمی و همچنین توسعه انواع فناوری های جدید ارزیابی غیر مخرب نیاز دارد. آکوستیک امیشن اساساً شامل

^۱ CFRP

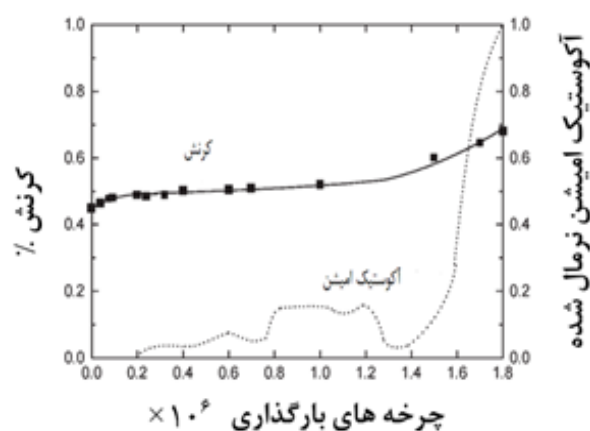
کرده است. چنانچه در شکل دیده می شود تغییر طول ترک تورق در چندلایه ای^۲ است که مستقیماً توسط میکروسکوپ نوری اندازه گیری شده است. همچنین مشاهده می شود که بین نتایج آکوستیک امیشن و مشاهده مستقیم نوری از رشد آسیب تورق تحت بارگذاری خستگی رابطه مستقیم وجود دارد. هر تغییر در میزان پیشرفت آسیب همراه با تغییر مربوطه در میزان انباشت رویداد آکوستیک امیشن است. آسیب خستگی به کامپوزیت ها نیز با استفاده از روش آکوستیک امیشن حرارتی قابل تشخیص است. این روش اصلاح آکوستیک امیشن معمولی است و شامل گرم کردن کامپوزیت قبل از پخته شدن در کوره یا استفاده از هیتر دستی در دمای متوسط ۱۰۰-۱۵۰ درجه سانتیگراد و به دنبال آن خنک کردن در دمای اتاق است. در طی یک سیکل حرارتی گرمایش و خنک سازی، سطوحهای مخالف ترکهای خستگی به دلیل انبساط حرارتی و توزیع مجدد کرنشهای باقیمانده در کامپوزیت، با هم ساییده میشوند. اصطکاک ناشی از سایش سطوحهای ترک، امواج آکوستیک امیشن ایجاد میکند که توسط حسگرها تشخیص داده میشود. این روش پتانسیل شناسایی سطوح کم آسیب خستگی را دارد که با استفاده از آکوستیک امیشن معمولی به راحتی قابل شناسایی نیست. ساتو و همکاران [۱۵، ۱۶] ریز ترک های ناشی از بارگذاری خستگی را در کامپوزیتهای با استفاده از روش آکوستیک امیشن شناسایی کرد. با این حال، این روش به ندرت برای تشخیص آسیب خستگی استفاده میشود، زیرا اغلب گرم کردن و خنک سازی کامپوزیت عملی نیست.



شکل ۴ مقایسه طول تورق اندازه گیری شده توسط میکروسکوپ نوری و تعداد رویداد آکوستیک امیشن در هنگام بارگذاری خستگی یک کامپوزیت کربن/اپوکسی. جدول از کوهن و همکاران [۸]

در مواد کامپوزیتی اگر به علت بارگذاری تغییراتی مانند لایه لایه شدن (تورق)، جدا شدن رزین، شکسته شدن الیاف تقویت

کامپوزیتهای چندلایه با استفاده از خصوصیات روش آکوستیک امیشن قابل تشخیص است. همچنین تورق و شکست الیاف با داشتن میزان آکوستیک امیشن بسیار بالاتر از ترک های ماتریس قابل تشخیص است. در بعضی موارد میتوان بین ترک خوردگی ماتریس، تورق و خرابی الیاف محلی تفاوت قائل شد. با این حال، شناسایی مکانیزم های مختلف آسیب خستگی ممکن است دشوار باشد، زیرا سیگنال های آکوستیک امیشن اغلب توسط سیگنال هایی به وسیله اصطکاک و سایش سطح ترک با هر بارگذاری تولید می شوند. با تجزیه و تحلیل دقیق از طیف آکوستیک امیشن و تکنیک های خوب فیلتر صدا، میتوان بین انواع خاصی از آسیب خستگی تفاوت قائل شد.



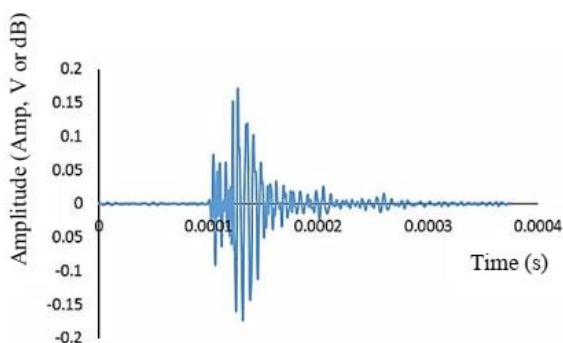
شکل ۳ تأثیر تعداد چرخه های بار کشش-کشش بر افزایش کرنش و میزان آکوستیک امیشن یک کامپوزیت بور/اپوکسی در کنترل بار. نمودار از ویلیامز و همکاران [۱۴]

قابلیت اطمینان روش آکوستیک امیشن برای نظارت دقیق بر پیشرفت خستگی در مطالعات بیشمار اثبات شده است. به عنوان مثال، شکل ۳ [۱۴] رابطه بین میزان آکوستیک امیشن و افزایش کرنش را برای یک کامپوزیت بور/اپوکسی در طول آزمایش خستگی تحت بار-کنترل شده نشان میدهد. همانطور که در شکل دیده میشود کرنش به تدریج تا حدود ۱/۵ میلیون سیکل افزایش مییابد و سپس با نزدیک شدن کامپوزیت به خرابی نهایی، سرعت آن با بارگذاری بیشتر، سریعتر افزایش می یابد. این روند با نتایج آکوستیک امیشن منعکس شده است که در ابتدا کم است، اما به دلیل افزایش بروز ترک خوردگی تورق (لایه لایه شدن) و شکستگی الیاف به سرعت به سمت خرابی پیش می رود. مثال دیگری از کاربردهای این روش در مواد کامپوزیت در شکل (۴) [۸] آورده شده است که تعداد رویدادهای آکوستیک امیشن را در هنگام بارگذاری سیکلیک کامپوزیت کربن/اپوکسی ثبت

² Laminate

¹ Load-controlled

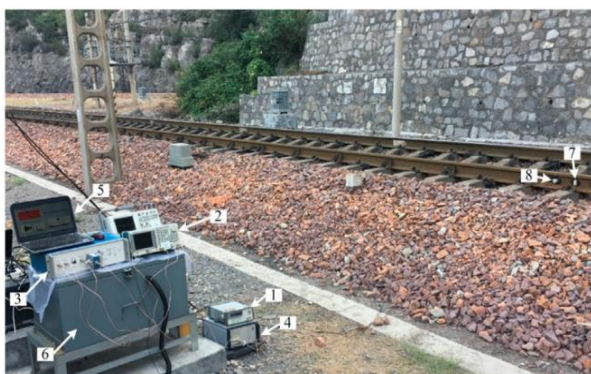
در شکل (۷) نمونه سیگنال آکوستیکی دریافت شده توسط سنسور آکوستیک از نمونه در لحظه ۳۴/۰۵ ثانیه از شروع آزمون خمشی نمایش داده شده است. همانطور که در شکل (۷) مشاهده میگردد دامنه سیگنال دستگاه داده برداری میتواند برحسب جریان ، ولتاژ



شکل ۷ نمونه سیگنال آکوستیک دریافت شده حین آزمون خمشی از ساندویچ پانل

نتایج حاصل نشان داد که مکانیزم های شکست ترد شامل شکست ماتریس و شکست فوم در هر رویداد مختلف آکوستیک، مجموع انرژی های بالاتر با پراکندگی کمتر در بازه فرکانسی پایینتر نسبت به مکانیزم های شکست نرم مانند شکست الیاف شیشه آزاد میکنند. اما رویدادهای آکوستیک در مکانیزم شکست نرم الیاف شیشه با مجموع انرژی های کمتر و به صورت پراکنده در بازه فرکانسی بالاتر اتفاق افتاده است. تطبیق تصاویر چشمی با داده های آکوستیکی و همچنین نمودار نیرو جابجایی، علاوه بر صحنه گذاری در تعیین مکانیزم های تخریب در این پانل های ساندویچی، منجر به تعیین بازه فرکانسی جدید شکست فوم متخلخل (۱۹۰ الی ۲۲۰ کیلوهرتز) نیز گردید.

در تحقیق عملیاتی آقای ژین ژانگ^۱ و همکاران به بررسی آسیب با سیستم آکوستیک امیشن در نقص یابی ریل قطار پرداختند. سیستم مورد استفاده در این تحقیقات در شکل زیر آورده شده است [۱۸].



شکل ۸ محیط آزمایش و سیستم تست [۱۸]

کننده و غیره ایجاد شود، سیگنال های آکوستیک امیشن تولید میشود. علاوه بر موارد فوق عیوبی مانند خوردگی و نشستی هم سیگنال های فراصوتی منتشر میکنند. مثلاً ایجاد خوردگی در کف مخازن نفت، سیگنال های انفجاری تولید می کند که از میان مایع نفت تا دیواره مخزن منتشر میشود و با نصب سنسورها بر روی دیواره میتوان این سیگنال ها را شناسایی نمود. سیگنال های ایجاد شده بر اثر نشستی میتواند هم به صورت انفجاری و هم به صورت پیوسته باشد. اساساً انفجارها در فشار بالا رخ میدهند و زمانی که فشار کم است و یا جریان موجود آرام است، سیگنال های پیوسته با دامنه پایین و فاصله انتشار کوچک ایجاد میشود. توانایی آزمون آکوستیک امیشن در شناسایی این عیوب باعث شده تا استفاده از این روش در بازرسی تجهیزاتی مانند مخازن تحت فشار کامپوزیتی، تانک های نگهداری و سیستم های لوله کشی کامل گسترش یابد.

۴- تشخیص آسیب در یک نمونه کامپوزیتی با روش آکوستیک امیشن

آقای حمزه لو و همکاران [۱۷] به بررسی مکانیزم های تخریب در خمشی پانلهای ساندویچی کامپوزیت پایه پلیمری توسط روش آکوستیک امیشن پرداختند. ایشان با تحلیل داده های آکوستیکی، به بررسی و تشخیص مکانیزم های خرابی در پانل های ساندویچی کامپوزیت پلی استر/ شیشه با هسته فوم پلی اورتان در آزمون خمشی سه نقطه با اعمال تضعیف اولیه حاصل از ضربه های با انرژی مختلف پرداختند.



شکل ۵ دستگاه آزمون ضربه به همراه کلمپ کردن قطعه در موقعیت خود



شکل ۶ یکی از نمونه ساندویچ پانل ها هنگام بارگذاری خمشی

¹ Xin Zhang

نوع تست	مزایا	معایب
تست مایع نافذ	مناسب برای بازرسی سطحی محصولات تولید انبوه.	۱. محدود به عیوب سطحی است. ۲. متغیرهای بسیار زیادی بر آزمون تأثیر می گذارند. ۳. فرآیند نیاز به تمیزکاری دارد.
بازرسی ذرات مغناطیسی	توانایی تشخیص عیوب روی سطح یا نزدیک به آن در مواد فرومغناطیسی.	۱. محدود به عیب در مجاورت سطح. ۲. فقط برای آزمایش مواد فرومغناطیسی قابل استفاده است. ۳. آزمایش اشکال پیچیده ممکن است امکان پذیر نباشد. ۴. حذف هر گونه پوشش مورد نیاز است.
بازرسی رادیوگرافی	قابلیت تشخیص عیوب سطحی و زیرسطحی را دارد.	۱. خطرات ایمنی و مسائل مربوط به دفع زباله. ۲. زمان بر. ۳. گران. ۴. بستگی به جهت عیوب دارد.
تست اولتراسونیک	قابلیت تشخیص عیوب سطحی و زیرسطحی را دارد.	۱. عیوب کوچکتر از ساختار دانه نمی توانند شناسایی شوند. ۲. تفسیر نادرست سیگنال ها ممکن است رخ دهد.
تست جریان گردابی	توانایی تشخیص عیوب روی سطح یا نزدیک به آن در موادی که با یا بدون پوشش رسانای الکتریکی هستند (مانند رنگ).	۱. محدود به آزمایش مواد رسانای الکتریکی. ۲. ارزیابی عیوب زیرسطحی در مواد فرومغناطیسی با این تکنیک محدود می شود. ۳. نظریه جریان های گردابی، به طور کلی، پیچیده است.
آکوستیک امیشن	قادر به تشخیص عیوب سطحی و زیرسطحی با اطلاعات مربوط به انتشار عیب است.	۱. ساختار تحت آزمایش امواج تنش را کاهش می دهد. ۲. صداهای بیرونی می توانند باعث تعبیر نادرست شوند.

۶- مزیت های آکوستیک امیشن

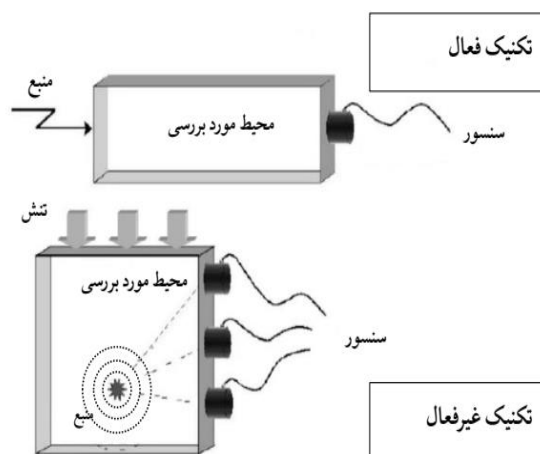
آکوستیک امیشن یک روش تشخیص دینامیک است و میتواند به صورت آنی ناپیوستگی ها را در یک سازه تحت کشش نشان دهد.

در مورد تجهیزاتی نظیر مخازن بزرگ و در مواردی که دلیلی برای بازرسی داخلی وجود ندارد، می توان در حین سرویس و بدون باز کردن تجهیزات از این روش برای شناسایی و موقعیت یابی عیوبی مانند نشتی و خوردگی استفاده کرد. در این

در شکل (۸)، (۱) مولد سیگنال، (۲) مولد امواج، (۳) تقویت کننده ولتاژ بالا، (۴) سیستم دریافت سیگنال آکوستیک امیشن، (۵) لپتاپ، (۶) جعبه برق، (۷) سنسور گیرنده و (۸) سنسور فرستنده می باشند. [۱۸]

۵- تفاوت آکوستیک امیشن با سایر روشهای ارزیابی غیرمخرب

آزمون آکوستیک امیشن در سه مبحث اصلی با سایر روش های غیر مخرب تفاوت دارد. اول: سیگنال دریافتی از درون خود ماده نشأت میگیرد نه از یک منبع خارجی. دوم: آنکه آکوستیک امیشن معمولاً حرکت عیوب در ماده را تشخیص می دهد در حالیکه سایر روش ها غیرمخرب موجودیت و ابعاد هندسی عیب را مشخص میکنند. سوم: تفاوت اصلی که روش آکوستیک امیشن با سایر روش های غیرمخرب دارد، غیر فعال بودن این روش است در حالیکه سایر روش های غیر مخرب در اکثر موارد فعال^۲ هستند به عنوان مثال روش اولتراسونیک^۳ یا رادیوگرافی^۴ یا سایر روشها برای بدست آوردن اطلاعات راجع به قطعه مورد نظر نیاز به اعمال انرژی خارجی یا تغییری بر روی ماده مورد نظر هستند، ولی در روش آکوستیک امیشن انرژی آزاد شده در داخل ماده مرجعی برای کار بازرسی می باشد.



شکل ۹ تفاوت روشهای آکوستیک امیشن فعال و غیرفعال [۱۹]

جدول ۱ قابلیت ها و محدودیت های برخی از روشهای غیرمخرب [۲۰]

نوع تست	مزایا	معایب
تست بصری	مناسب برای بازرسی سطح و نظارت بر مراحل ساخت یک محصول	۱. فقط به عیوب سطح محدود می شود. ۲. به شدت به تجربه بازرس بستگی دارد.

³ Ultrasonic
⁴ Radiography

¹ Passive
² Active

امیشن یک اتفاق منحصر به فرد است و در بارگذاری مشابه تکرارپذیر نمی‌باشد. سازه تحت تست امواج منتشر شده را تضعیف می‌کند. از این جهت برای اطمینان از نتایج بازرسی باید سنسورها در فواصل مناسبی نصب شوند. سیگنال‌های شناسایی شده انرژی پایینی دارند که برای شناسایی آنها به تجهیزات الکترونیکی پیچیده و نسبتاً گران‌قیمتی نیاز است. آکوستیک امیشن می‌تواند در معرض نویزهای خارجی قرار بگیرد، به طوری که نویز پس‌زمینه گاهی اوقات به سختی از سیگنالها تفکیک می‌شود. آزمون آکوستیک امیشن در مورد نویزهایی که از آستانه شناسایی فراتر می‌روند، حساس است و آنها را نیز مانند سیگنال‌های مفید آکوستیک پردازش می‌کند. در این صورت آستانه شناسایی باید افزایش یابد که آن هم به فاصله کمتر بین سنسورها و در نتیجه استفاده از سنسورها و کانالهای بیشتر منتهی می‌شود. این در حالی است که در بالاتر از یک سطح نویز معین تست کارامدی خوبی ندارد. در این روش ملاک و معیاری برای ارزیابی به شکل داده‌های متداول و موجود، در دسترس نیست و دسته‌بندی و سنجش نتایج آکوستیک امیشن به شدت به دانش و تجربه عرضه‌کننده خدمات بستگی دارد [۱۷، ۲۱].

۸- سایر کاربردهای آکوستیک امیشن

از جمله قابلیت‌های ویژه آکوستیک امیشن میتوان به موارد زیر اشاره کرد:

۱) تحلیل رفتار و خواص مواد مختلف مانند فلزات، سرامیک‌ها، کامپوزیت‌ها و سازه‌های بتنی برای تشخیص رشد ترک، خستگی، خزش، تسلیم، شکست الیاف و تورق (لایه لایه شدن).

کاربردهای آزمون آکوستیک امیشن در حین فرآیند شامل موارد زیر است:

- پردازش امواج در ماده شامل شناسایی عیوب مختلفی مانند تخلخل و ناخالصی، تشخیص عیوب جوشکاری و لحیم‌کاری نظیر ترک و عدم نفوذ.

- مانیتورینگ سازه شامل: کنترل و بازرسی پیوسته شامل سازه‌های فلزی، معادن و غیره

- تست‌های دوره‌ای شامل: مخازن تحت فشار، خطوط لوله، پل‌ها و کابل‌ها، تشخیص نشتی.

- کاربردهای ویژه در صنایع شیمیایی و پتروشیمی شامل: آزمایش تانکرهای ذخیره‌سازی، آزمایش مخازن و رآکتورها، سکوها اسکله، شیرهای هیدرولیک.

- کاربرد در صنایع برق شامل: مخازن رآکتورهای اتمی، ژنراتورهای بخار، ترانسفورماتورها، تجهیزات رادیویی.

- کاربردهای صنایع هوافضا شامل: تست ترک‌های خستگی، تست سازه‌های کامپوزیتی.

روش قابلیت بازرسی از راه دور قطعات و سیستم‌ها وجود دارد و می‌توان داده‌ها را به صورت کنترل از راه دور انتقال داد. به همین دلیل کاربرد این روش در خطوط لوله‌های نفتی و صنایعی که نزدیک شدن به آنها خطرناک است، بسیار مفید است.

نسبت هزینه به کارایی در این روش پایین است. به نحوی که در جاهایی که انجام تست با روشهای معمول هزینه‌های سرسام‌آوری دارد نظیر پالایشگاه‌ها، نیروگاه‌ها، صنایع هوافضا و ... استفاده از این روش سبب صرفه‌جویی اقتصادی چشمگیری خواهد شد. سرعت انجام تست بسیار زیاد است. مثل سازه یک مخزن ۱۲۰۰۰ تنی که برای تست آن با روش اولتراسونیک بیش از دو هفته وقت نیاز است، اما با کمک آزمون آکوستیک امیشن ظرف مدت ۲۴ ساعت به کمک ۶۴ سنسور قابل انجام است.

این روش یکی از حساسترین روش‌های تست غیر مخرب است و قادر به شناسایی عیوب بسیار ریز است و می‌تواند عیوب مختلفی با ابعاد یک میکرومتر را شناسایی کند.

این روش قادر است یک سازه کامل را در شرایط عملیاتی آن ارزیابی کند و بازرسی درست در زمان رشد یک عیب و بلادرنگ^۱ انجام می‌شود. به همین دلیل می‌توان از این روش برای مانیتورینگ پیوسته تجهیزات در زمان سرویس‌دهی استفاده کرد. این روش نسبت به هندسه قطعات مورد تست حساسیت کمی دارد. قادر به تست مشخصات و خصوصیات مواد است. بازرسی با سرعت بالایی انجام شده و نتایج ذخیره می‌شود. می‌توان این نتایج را در بازرسی‌های بعدی ارزیابی نمود. با استفاده از روابط مثلثاتی و پردازش اطلاعات دریافتی از سنسورها میتوان مکان عیب را با دقت مشخص بدست آورد. بدین ترتیب میتوان از سعی و خطاهای مکرر یا جابجایی قطعات برای تشخیص مکان عیب که در روش‌های دیگر اجتناب‌ناپذیر است، مانع شد.

آزمون آکوستیک امیشن می‌تواند در تمامی مراحل بازرسی که شامل تست قبل از سرویس‌دهی و حین سرویس‌دهی است، انجام شود. به طور مثال مخازن و سیستم‌های تحت فشار را میتوان بدون تعطیل کردن و در طول سرویس‌دهی مورد ارزیابی مجدد یا بازبینی‌های دوره‌ای قرار داد.

در مقایسه با بیشتر روش‌های غیرمخرب در آزمون آکوستیک امیشن ناپیوستگی خودش راه انداز انرژی است و قطعه خودش سیگنال ایجاد می‌کند [۱۷، ۲۱].

۷- محدودیت‌های آکوستیک امیشن

در کنار مزایای استفاده از روش آکوستیک امیشن این روش محدودیتهایی هم دارد که در ادامه به آن‌ها اشاره میشود. عیوبی که نه رشد می‌کنند و نه حرکت می‌کنند، آکوستیک امیشن تولید نمی‌کنند و بنابراین نمی‌توان آنها را شناسایی نمود. آکوستیک

¹ Real Time

- کاربردهای صنایع الکترونیک شامل: تستنداکتورها، تست ترک‌های زیرلایه‌های تجهیزات الکترونیک.

آکوستیک امیشن یک رویداد طبیعی است که در محدوده گسترده‌ای از مواد، سازه‌ها و فرایندها صورت می‌پذیرد. بزرگترین اندازه امواج آکوستیک امیشن زلزله می‌باشد در حالی که کوچکترین اندازه مشاهده شده این آزمون حرکت تعداد کمی از نابعیها در درون یک جسم فلزی تحت تنش می‌باشد. از نظر کاربرد آزمون آکوستیک امیشن بطور کلی به دو دسته تقسیم‌بندی می‌شود. در دسته اول آزمون آکوستیک امیشن به عنوان یک روش کارآمد در زمینه تست غیرمخرب شناخته می‌شود و در دسته دوم آکوستیک امیشن به عنوان یک آزمون مفید جهت پیش‌بینی عدم کارایی در بحث نگهداری مطرح می‌شود. کاربردهای دسته اول عبارت است از: بررسی خصوصیات مکانیکی مواد، آزمایشهای اطمینان قبل از سرویس‌دهی، نمایش لحظه به لحظه فرایند.

کاربردهای دسته دوم عبارتند از: تست‌های ارزیابی مجدد کارایی سازه‌ها، تشخیص نشتی بازرسی دوره‌ای مخازن تحت فشار [۲۲، ۲۳].

احمدی و همکاران جدایش لایه آلومینیوم 2024-T3 را تحت بارگذاری مود یک و مود دو شکست مورد مطالعه قرار دادند. [۳۲]. همچنین اکافر و همکاران از آکوستیک امیشن به عنوان روش پایش همزمان جهت شناسایی رشد ترک در ورق آلومینیوم 2024-T6 ترمیم شده بهره بردند. [۳۳].

۹- سیگنال‌های آکوستیک امیشن

سیگنال آکوستیک امیشن، سیگنالی الکتریکی است که با دریافت موج توسط سنسور تولید شده است. این امواج که توسط سنسورها ثبت شده و به صورت سیگنال‌های الکتریکی وارد سیستم آکوستیک امیشن میشوند، به دو گروه تقسیم میشوند. هر کدام از این انواع، منابع خاص خود را دارد. دسته اول مربوط به رویداد آکوستیک امیشن است که برای انجام آزمون واجب بوده و حاوی اطلاعات مفیدی از رویداد درون قطعه است و دسته دوم شامل تمامی امواج ناخواسته‌ای که نه تنها حاوی اطلاعات مفید نیستند، بلکه وجود آنها انجام صحیح آزمون را تحت تأثیر قرار می‌دهد و این امواج را اصطلاحاً نویز می‌نامند. همانطور که در شکل ۱۰ [۲۵] نشان داده شده است سیگنال‌های دریافت شده به دو نوع انفجاری و پیوسته تقسیم می‌شوند [۲۴].

سیگنال انفجاری^۱ این نوع از موج زمانی بوجود می‌آید که یک سیگنال مستقل که در نتیجه یک اتفاق آکوستیک امیشن مستقل تولید شده است، مشاهده گردد. این نوع سیگنال به

تنهایی یا همراه با سیگنال‌های انفجاری دیگر و یا در زمینه‌ای از سیگنال‌های پیوسته مشاهده می‌شود. انفجار، پالس یا بسته موج کوتاهی است که گاهی اوقات ممکن است در زمینه‌ای از سیگنال‌های پیوسته و یا نویزها باشد، ولی نقاط شروع و پایان به وضوح از نویزها مشخص میشوند. هنگامی که یک انفجار به وسیله سیستم آکوستیک امیشن شناسایی می‌شود، اصطلاحاً می‌گویند که یک ضربه وارد شده است. از منابع این نوع موج می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: پارگی جوش سرد در فرایندهای اصطکاکی، برخورد برجستگی‌های سطوح در تماس باهم در اصطکاک، شکستن براده در حین ماشینکاری، فرایند شکست ابزار در ماشینکاری.

سیگنال پیوسته^۲: چنانچه نرخ وقوع زیاد باشد، سیگنال‌های انفجاری مستقل با یکدیگر ترکیب شده و به صورت پیوسته درمی‌آیند، سیگنال‌های پیوسته شامل دامنه‌ها و فرکانسهای گوناگونی هستند که پایان نمی‌یابند. باید توجه داشت که امواج انفجاری و پیوسته مفاهیم نسبی هستند و ممکن است یک سیگنال پیوسته نسبت به یک حد آستانه انتخابی انفجاری تلقی شود.

۱۰- پارامترهای شناسایی امواج آکوستیک امیشن

یک موج صوتی نه تنها میتواند از رشد ترکها و یا منابع مختلف ایجاد شود بلکه این موجها از منابع غیر دلخواه مانند منابع نویز نیز ممکن است ایجاد گردند. به همین جهت شناخت پارامترهای یک سیگنال از اهمیت خاصی برخوردار است. پنج پارامتر مهم تحلیل سیگنال‌های آکوستیک امیشن در شکل (۶) [۲۵] نشان داده شده است. این پارامترها عبارتند از: شمارش ضرب آهنگها (شمارش پالس‌ها)، دامنه، زمان استمرار، زمان رشد و انرژی وقایع. در بیشتر آزمون‌ها از تعدادی از این پارامترها استفاده می‌شود. پارامترهای دیگری نظیر انرژی واقعی، فرکانس متوسط و طیف لحظه‌ای برای بعضی کاربردها استفاده می‌گردد. همزمان با این پارامترها ویژگی هر ضربه به کامپیوتر منتقل می‌شود که معمولاً شامل متغیر مهمی مانند زمان استمرار سیگنال، مقدار لحظه‌ای نیروی اعمالی، شمارش سیکل‌های بارگذاری (در صورت انجام تست خستگی) و سطح لحظه‌ای نویزها می‌باشد. طول مشخصات هر ضربه معمول ۲۰ تا ۴۰ بایت می‌باشد [۲۲].

۱۰-۱- حداکثر دامنه (A)^۳

حداکثر دامنه معادل با بیشترین ولتاژی است که یک موج آکوستیک به آن می‌رسد. این پارامتر قابل تشخیص بودن سیگنال‌ها را تعیین می‌کند و مستقیماً با بزرگی واقعی که در

³ Amplitude

¹ Burst Signal

² Continuous signal

برای بررسی سیگنال‌های آکوستیک امیشن میباشد، اما به شدت به خواص آکوستیکی ماده و حسگر بستگی دارد. در بیشتر موارد سیگنال با تعداد پالس‌های شمرده شده کمتر از ۳ و زمان استمرار کمتر از ۳ میکرو ثانیه به عنوان سیگنال‌های ناخواسته در نظر گرفته شده و در تحلیلها حذف می‌گردند [۲۶].

۱۰-۳- انرژی وقایع (E)

انرژی وقایع به عنوان پارامتر نشان‌دهنده بزرگی سیگنال آکوستیک امیشن میباشد که مقدار آن برابر با سطح زیر منحنی سیگنال تقویت شده (MARS) میباشد. این پارامتر از جهات زیادی به شمارش پالسها و حتی دامنه برتری دارد، زیرا هم به دامنه و هم به زمان پالس بستگی دارد و در عین حال وابستگی کمتری به فرکانس کاری و آستانه تعیین شده دارد.

۱۰-۴- زمان استمرار (D)

زمان استمرار معادل با زمان طی شده از اولین پالس آکوستیک امیشن گذرنده از آستانه تا آخرین آنها می‌باشد. این پارامتر با مقیاس میکروثانیه اندازه گیری میشود و به بزرگی واقعه صوتی و خواص صوتی و انعکاسی ماده وابسته است. این پارامتر برای شناسایی فرایندهایی نظیر لایه لایه شدن (تورق) کامپوزیت‌ها و نیز در فیلتر کردن نویزها بسیار مفید است.

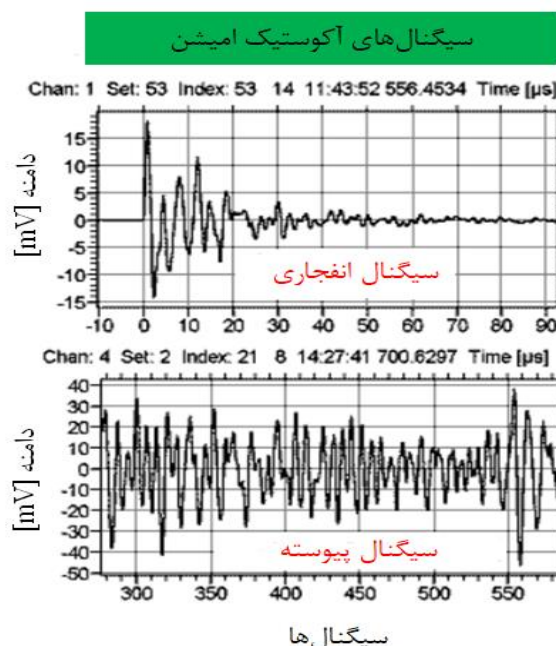
۱۰-۵- زمان رشد با اوج (R)

زمان طی شده از پالس گذرنده از آستانه تحریک تا حداکثر پیک (اوج) سیگنال است و به خواص انتشار موج در ماده بستگی دارد. از این پارامتر برای انواع مختلف اصلاح سیگنال ورود نویزها استفاده میشود.

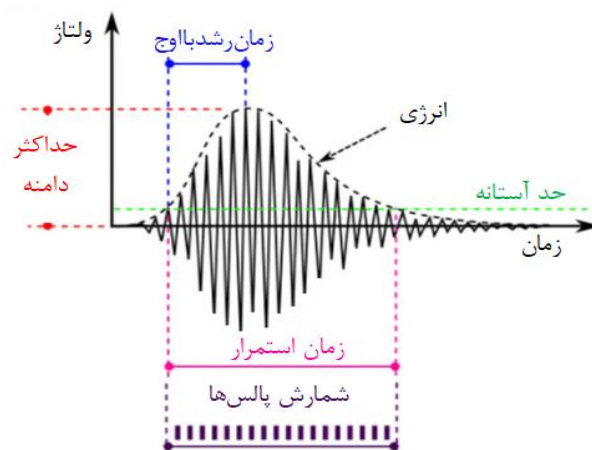
۱۱- اثر کایزر و فلیسیتی

رابطه بین رویداد آکوستیک امیشن و سابقه بار قبلی توسط کایزر^۵ و فلیسیتی بیان شده است. این آثار هم در کامپوزیت و هم در فلزات به شکل های مختلف رخ می‌دهد. این اثر که خصوصیت برگشت‌ناپذیری امواج آکوستیک امیشن را در بر می‌گیرد، چنین بیان می‌شود که امواج آکوستیک امیشن هنگامی پدید می‌آیند که سازه برای اولین بار تحت بارگذاری قرار گیرد.

منبع رخ داده، متناسب است. مقدار دامنه ممکن است از چند ولت تا چند میکروولت تغییر کند. دامنه از مناسبترین پارامترها برای مطالعات آماری توابع توزیع است که معمولاً با واحد دسی بل^۱ بیان میشود، به نحوی که در آن ۱ میکروولت در مبدل برابر با صفردسی بل، ۱۰ میکروولت برابر با ۲۰ دسی بل، ۱۰۰ میکروولت برابر با ۴۰ دسی بل و ... بیان میشود.



شکل ۱۰ انواع سیگنال آکوستیک امیشن [۲۴]



شکل ۱۱ یک نمونه سیگنال آکوستیک امیشن و شناسایی پارامترها [۲۰]

۱۰-۲- شمارش پالس‌ها (شمارش ضرب آهنگ‌ها) (N)

تعداد ضرب آهنگ‌ها معادل با تعداد پالس‌هایی هستند که از آستانه معین عبور می‌کنند. این پارامتر از ساده ترین پارامترها

⁴ Rise Time

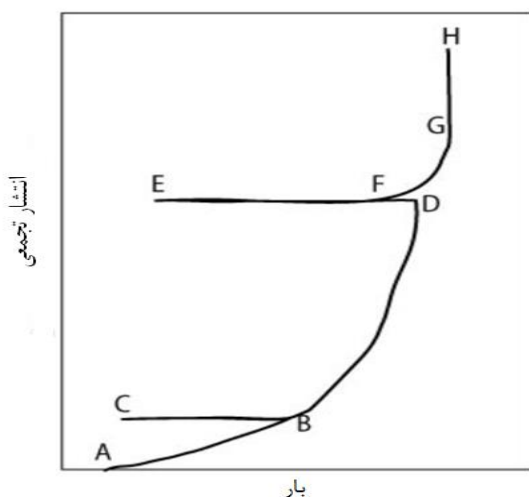
⁵ Kaiser

¹ dB

² Counts

³ Duration

به نقطه شکست نزدیک میشوند، برای پلاستیک های تقویت شده اندازه گیری شده است. نسبت FR کمتر از ۰/۹۵ سبب رد مخازن معمولی و تحت فشار از جنس FRP در تست آکوستیک امیشن می گردد. مطابق با استاندارد ASME در هنگام تست مخازن تحت فشار در برخی موارد بهتر است که از اطلاعات مربوط به بارگذاری اول چشم پوشی کرد و به بارگذاری های بعدی توجه کرد. دلیل این امر این است که بسیاری از سیگنال های بارگذاری اول ناشی از تسلیم نقطه ای در سازه بوده که از نظر سازه های چندان قابل اهمیت نیستند. در حالی که عیوب خطرناک و پراهمیت در بارگذاری دوم که $FR < 1$ می باشد، شروع به انتشار موج میکنند. در شکل (۸) [۱۹] انتشار موج ناشی از بارگذاری اولیه از نقطه A تا B دیده میشود، اما در مدت باربرداری از B تا C انتشاری دیده نمیشود. پس از بارگذاری مجدد نیز تا زمان رسیدن به نقطه B انتشاری دیده نمی شود (خط افقی دیده می شود).



شکل ۱۲ انتشار آکوستیک امیشن نشان دهنده اثر کایزر در (BCB)، اثر فلسیتی در (DEF) و انتشار در حین ثابت نگه داشتن نیرو (GH) [۱۹]

که این پدیده همان اثر کایزر می باشد. نیرو و انتشار امواج تا نقطه D افزایش پیدا میکنند. سپس در نقطه D یک سیکل باربرداری دیگر رخ میدهد. این بار به دلیل سطح تنشهای بالاتر عیوب اساسی و خطرناک در سیکل بارگذاری مجدد، در نقطه F در باری کمتر از ماکزیمم قبل شروع به انتشار امواج میکنند که این رفتار به عنوان اثر فلسیتی شناخته میشود. شکل (۸) [۱۹] همچنین انتشار پیوسته امواج در زمان ثابت نگه داشتن نیرو (GH) را به تصویر میکشد. اثر فلسیتی و نیز انتشار پیوسته امواج در مدت نگهداری باردارای یک توضیح مشترک میباشند. هر دوی این پدیده ها ناشی از طبیعت ناپایدار عیوب خطرناک سازه های می باشند.

بعد از برداشتن بار و بارگذاری مجدد تا رسیدن به حداکثر بار قبلی هیچ موج آکوستیک امیشنی در جسم تولید نخواهد شد. به این ترتیب هر سیگنال آکوستیک امیشن تنها یکبار ایجاد میشود. بدین ترتیب با توجه به اثر کایزر یک ماده تحت بار تنها زمانی که سطح بار از حداکثر مقدار قبلی آن فراتر رود، امواج آکوستیکی منتشر میکند. در طول بارگذاری مجدد و قبل از رسیدن به حداکثر بار قبلی، مواد به صورت الاستیکی رفتار می کنند و اگر اثر کایزر برای این مواد ثابت باشد، قبل از رسیدن سطح تنش به میزان حداکثر قبلی هیچ سیگنالی ثبت نخواهد شد و یا مقدار اندکی ثبت می شود [۲۷]. در تمام بارگذاری های مجدد نیز تنها زمانی که سطح نیرو از حداکثر میزان قبلی آن تجاوز کند، سیگنال های آکوستیک امیشن منتشر می شوند. در بارگذاری های بعدی هر انتشاری قبل از رسیدن بار به حداکثر مقدار قبلی، ناشی از ایجاد عیوب در سازه می باشد. ظهور امواج پایین تر از بار حداکثر بار قبلی اثر فلسیتی نامیده می شود. نسبت بارگذاری جدیدی که به ظهور امواج منجر میشود، (p_e) به حداکثر بارگذاری قبلی (p_m) نسبت فلسیتی (Fr) نامیده میشود [۲۸]. اثر فلسیتی^۱ و نسبت آن طبق رابطه زیر محاسبه میگردد:

$$Fr = \frac{P_e}{P_m} \quad (۱)$$

چنانچه این نسبت یک یا بزرگتر از یک باشد، نشانگر عدم ایجاد عیب در سازه میباشد و چنانچه این عدد از یک کمتر باشد نشانگر ایجاد عیب و خرابی در هنگام بارگذاری مجدد میباشد. اثر فلسیتی قطعیت بیشتری در پلاستیک های تقویت شده توسط الیاف نسبت به فلزات دارد. درجه اثر کایزر- فلسیتی برای فلزات تا حدی متفاوت و متغیر است و ممکن است این اثر پس از گذشت چند ساعت یا چند روز برای آلیاژهایی که به صورت محسوسی در دمای اتاق بازبایی می شوند، محو گردد. برآیند صحبت های بالا بر این نکته تأکید دارد که برای جلوگیری از نابود شدن اطلاعات مفید در آزمون آکوستیک امیشن، این کار باید کاملاً با برنامه ریزی انجام شود.

آقای دهمنه و همکاران [۲۹] از اثر فلسیتی و نسبت آن^۳ به عنوان معیار شکست در تحلیل مخازن تحت فشار پوشیده شده با کامپوزیت^۲ با استفاده از آزمون آکوستیک امیشن استفاده کردند. در حقیقت اثر کایزر را میتوان به صورت نسبت فلسیتی برابر با ۱ در نظر گرفت. کاهش نسبت فلسیتی هنگامی که مواد

³ FR

⁴ Composite overwrapped pressure vessel (COPV)

¹ Felicity (FE)

² FRP

۱۲- نتیجه گیری

آکوستیک امیشن یک روش ارزیابی غیرمخرب برای تشخیص آسیب در کامپوزیت‌های پلیمری تقویت شده با الیاف است و قابلیت‌ها و محدودیت‌های این روش در این مقاله بیان شده است. بهترین روش جهت بررسی نقص‌های تورقی و خرابی الیاف روش آکوستیک امیشن است. از مزایای روش آکوستیک امیشن میتوان به موارد زیر اشاره نمود: ۱- پیدا کردن یک ناپیوستگی در سازه تحت کشش به صورت آنی ۲- پیدا نمودن عیوبی مانند نشستی و خوردگی بدون باز کردن تجهیزات ۳- قابلیت بازرسی از راه دور قطعات و سیستم‌ها ۴- پایین بودن نسبت هزینه به کارایی ۵- سرعت انجام تست بالا ۶- حساسیت بالا ۷- مانیتورینگ پیوسته این حوزه از فناوری ارزیابی غیرمخرب است که به تحقیق و توسعه بسیار بیشتری نیاز دارد و روش‌های نوپه‌وری با پتانسیل وجود دارد، مانند توموگرافی کامپیوتری با اشعه ایکس و رادیوگرافی اشعه ایکس برگشتی کامپتون.

۱۳- مراجع

emission during fatigue loading", in Japan-U. S. Conference on Composite Materials, 4 th, Washington, DC, (1989).

[9] Barile, C., Casavola, C., pappalè, G., Paramsamy Kannan, V., "Application of different acoustic emission descriptors in damage assessment of fiber reinforced plastics: A comprehensive review", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 235, pp. 107083, (2020).

[10] Jiang, W., Zhang, Q., Zhang, Y., Guo, Z., and Tu, S.T., "Flexural behavior and damage evolution of pultruded fibre-reinforced composite by acoustic emission test and a new progressive damage model", *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 188, pp. 105955, (2020).

[11] Jang, B., and Kim, C., "Acoustic emission source localization in composite stiffened plate using triangulation method with signal magnitudes and arrival times", *Advanced Composite Materials*, Vol. 30(2), pp. 149-163, (2021).

[12] Šofer, M., Cienciala, J., Fusek, M., Pavlíček, P., and Moravec, R., "Damage analysis of composite CFRP tubes using acoustic emission monitoring and pattern recognition approach", *Materials*, Vol. 14, (2021).

[13] Saeedifar, M., Zarouchas, D., "Damage characterization of laminated composites using acoustic emission: A review", *Composites Part B: Engineering*, Vol. 195, pp. 108039, (2020).

[14] Williams, R., Reifsnider, K., "Investigation of acoustic emission during fatigue loading of composite specimens", *Journal of Composite Materials*, Vol. 8(4), pp. 340-355, (1974).

[15] Sato, N., Kurauchi, T., and Kamigaito, O., "Thermo-acoustic emission from a damaged composite", *SAMPE Journal*, Vol. 23(5), pp. 48-5, (1987).

[16] Sato, N., Kurauchi, T., and Kamigaito, O., "Detection of damage in composite materials by thermo-acoustic emission measurement", *Journal of Composite Materials*, Vol. 22(5), pp. 447-458, (1988).

[17] Hamzeloo, S.R., Refahi O., A., Zakizadeh, A.M., "Tehran: Analyzing degradation mechanisms in bending of polymer-based composite sandwich panels by acoustic emission method", *Journal of Science and Technology of Composites*, (2020). (in persian فارسی)

[18] Ohtsu, M., "Acoustic Emission Testing", Vol. 6, No. 5, (1973).

[19] Xin, Zh., and et al., "Applied Acoustics", Vol. 160, (2020).

[20] Gupta, M., Ahmad Khan, M., Butola, R., and Singari, R.M., "Department of Mechani", *Advances in*

[1] Talreja, R., "Fatigue damage mechanisms", *Modeling Damage, Fatigue and Failure of Composite Materials*, pp. 25-40, (2016).

[2] Herakovitch, C.T. and Hyer, M.W., "Damage-induced property changes in composites subjected to cyclic thermal loading", *Engineering Fracture Mechanic*, pp. 779-791, (1986).

[3] Forsyth, D., Kasap, S.O., Wacker, I., and Yannacopoulos, S., "Thermal fatigue of composites: Ultrasonic and SEM evaluations", *Journal of Engineering Material and Technology*, Vol. 116, pp. 113-120, (1994).

[4] Burke, S., Cousland, S.M., and Scala. C., "Nondestructive characterization of advanced composite materials", in *Materials Forum*, (1994).

[5] <http://www.idinspections.com/acoustic-emission-phenomenon/>

[6] Liu, P.F., Chua, J.K., Liuab, Y.L., and Zheng, J.Y., "A study on the failure mechanisms of carbon fiber/epoxy composite laminates using acoustic emission", *Materials & Design*, Vol. 37, pp. 228-235, (2012).

[7] Chang, F., Gordon, D., and Gardner, A., "A study of fatigue damage in composites by nondestructive testing techniques", in *Fatigue of filamentary composite materials*, *ASTM International*, (1977).

[8] Cohen, J., and Awerbuch, J., "Monitoring delamination progression in composites through acoustic

- [28] Miller, R., and McIntyre, P.J.C., "*OH: American Society for Nondestructive Testing*", NDT handbook acoustic emission testing, (1987).
- [29] Withiam, J., Fishman, K., and Gaus, M., "Evaluation of Metal-tensioned Systems in Geotechnical Applications", *Phase I*, (2001).
- [30] Dahmene, F., Yaacoubi, S., El Mountassiret, M., Langlois, C., and Bardoux, O., "Towards efficient acoustic emission testing of COPV, without Felicity ratio criterion, during hydrogen-filling", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 41(2), pp. 1359-1368, (2016).
- [31] <https://worldofndt.com/introduction-to-acoustic-emission-testing/>
- [32] Ahmadi Najafabadi, M., Sedighi, M., Salehi, M., Hossini Toudeshky, H., "Investigation and monitoring of delamination in FMLs under mode I and II loading with FEM and AE", *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15 (9), pp. 78-86, (2015).
- [33] Okafor, A.C., Singh, N., Singh, N., Oguejiofor, B. N., "Acoustic emission detection and prediction of fatigue crack propagation in composite patch repairs using neural network", *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, doi: 10.1177/0892705715573649, (2015).
- applications of Non-destructive Testing (NDT): A review", *Advances in Materials and Processing Technologies*, pp. 1-22, (2021).
- [21] <https://worldofndt.com/introduction-to-acoustic-emission-testing/>
- [22] <https://proeng.ir/>
- [23] Prosser, W.H., "The propagation characteristics of the plate modes of acoustic emission waves in thin aluminum plates and thin graphite/epoxy composite plates and tubes", *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 92(6), pp. 3441-3442, (1992).
- [24] Andreykiv, O., Skalsky, V., Serhiyenko, O., and Rudavskyy, D., "Acoustic emission estimation of crack formation in aluminium alloys", Vol. 77(5), pp. 759-767, (2010).
- [25] Ammar, I.B., Karra, C., El Mahi, A., El Guerjouma, R., and Haddar, M., "Mechanical behavior and acoustic emission technique for detecting damage in sandwich structures", *Applied Acoustics*, Vol. 86, pp. 106-117, (2014).
- [26] www.ndt.net.
- [27] Roger, T.K., "Handbook of non destructive testing, Chapter 10 (Acoustic Emission Testing) American Society for Nondestructive Testing", *Columbus*, (1993).

آموزش طراحی اجزاء ماشین با محوریت تقویت مهارت حل مسأله

کامران خیرعلی پور*دانشیار، گروه مهندسی مکانیک
بیوسیستم، دانشگاه ایلام، ایلام

چکیده: تقویت مهارت حل مسأله تخصصی ضروری است؛ زیرا حل صحیح و به موقع مسائل مربوط به شغل موجب افزایش بهره وری می شود و از خسارت های احتمالی مسائل جلوگیری می کند. تقویت این مهارت برای همه افراد با هر شغلی به خصوص افراد با تحصیلات دانشگاهی در همه رشته تحصیلی ضروری است. طراحی ماشین یکی از مهمترین تخصص های رشته های مهندسی مکانیک و مکانیک بیوسیستم است که نیاز است دانشجویان این درس را در حین تحصیل به خوبی فرا گیرند. با توجه به اهمیت بالای مهارت حل مسأله تخصصی، ضرورت اجرای مناسب فرایند طراحی برای حل مسائل مختلف و نقش مؤثر آموزش در تقویت این مهارت، هدف از تحقیق حاضر مرور مراجع مختلف در زمینه آموزش طراحی اجزاء ماشین با محوریت حل مسأله می باشد. علاوه بر تدریس کتاب درسی مناسب، حل تکالیف کتاب درسی، و آزمون های نوشتاری، تدریس درس طراحی اجزاء ماشین شامل پنج مؤلفه اصلی ۱- تولید ایده، ۲- ملاحظات ایمنی، ۳- طراحی روز، ۴- تقویت مسئولیت پذیری و ۵- انجام پروژه است. با در نظر گرفتن این موارد در دوره آموزشی درس مذکور، علاوه بر تقویت مهارت حل مسئله، پایه ای قوی و محرک قابل توجهی برای ورود دانشجویان به طراحی واقعی و ساخت محصول فراهم می گردد.

مقاله مروری

دریافت: ۱۴۰۱/۰۸/۲۹

پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۰۳

واژه های راهنما: آموزش، حل مسأله، طراحی، ماشین، ایمنی، مسئولیت پذیری

**Kamran
Kheiralipour***
Associate professor,
Mechanical
Engineering of
Biosystems
Department, Ilam
University, Ilam

Training the design of machine elements by focusing on improving problem solving skill

Abstract: Improving the specialized problem solving skill is necessary for solving specialized problems at work because the correct and timely solution of work problems increases productivity and prevents its possible corresponding damages. Improving this skill is necessary for all people with any job, especially people with academic education in all fields of study. Machine design is one of the most important specializations of mechanical engineering and mechanical engineering of biosystems which students need to learn it well during their studies. Due to the high importance of specialized problem-solving skill, the necessity of proper implementation of the design process to solve various problems, and the effective role of education in improving this skill, the purpose of the present research is to review various materials in the field of teaching the design of machine elements with a focus on problem solving skill. In addition to teaching a suitable textbook, solving the home works of the textbook, and writing tests, teaching the design of machine elements requires five main components including 1. Idea generation, 2. Safety considerations, 3. Design of the day, 4. Improving designers' responsibility, and 5. Conducting a project. Considering these cases in the educational course, a strong foundation and an important stimulus is provided for students to enter real design and product manufacturing with a problem solving approach.

Keywords: Education, Problem solving, Design, Machine, Safety, Responsibility

۱- مقدمه

حاضر نگاه به مهارت حل مسئله طراحان به منظور تقویت آن می باشد.

۲- مهارت حل مسئله

فرایند حل مسئله دارای پنج مرحله است شامل: جهت گیری کلی، تعریف مسئله، ارائه راه حل ها، تصمیم سازی برای انتخاب راه حل مناسب، و ارزیابی راه حل انتخابی [۶]. این فرایند چند مرحله‌ای سبب حل منطقی و صحیح مسئله شده، موجب می شود افراد از یافتن راه حل های ناگهانی و سریع پرهیز کنند، و مراحل ساختار یافته و هدفمندی را در این راستا دنبال کنند. در حل هر مسئله ای عوامل مختلفی دخیل هستند که به عوامل خارجی و عوامل داخلی تقسیم بندی می شوند [۷].

عوامل خارجی شامل ویژگی های مسئله مورد نظر برای حل و بازنمایی آن است و ویژگی های فردی حل کننده مسئله و مهارت حل مسئله او جزء عوامل داخلی حل مسئله هستند. ویژگی های مسائل شامل ساختار، پیچیدگی، و زمینه است که سبب دسته بندی مسائل به انواع مختلفی شده اند. یکی از انواع مسائل، مسائل طراحی هستند. پس از شناخت ویژگی ها و نوع مسئله، باید بازنمایی مسئله انجام شود تا مسئله به خوبی توسط فرد حل کننده درک شود و بتواند راه حل هایی برای حل آن پیدا کند. ویژگی های فردی شامل دانش، مولفه های شخصی و محرک (انگیزه ای و ارادی)، و ویژگی های حالت (خستگی، اضطراب، و استرس) می باشد. دانش شامل دانش آشنایی با مسئله، دانش زمینه های مرتبط با مسئله و دانش ساختاری، و شناخت است. شناخت شامل سبک های شناختی، فرا شناخت، و باورهای معرفتی است. مولفه های شخصی شامل نگرش ها و باورها در مورد مسائل، زمینه های مسائل، و توانایی های افراد و مولفه های محرک شامل درگیر شدن ارادی، تلاش کردن، پا فشاری بر انجام کار، و تصمیم سازی بر افزایش تلاش افراد در حل مسائل موثر است [۸].

مهارت حل مسئله توانایی حل کردن مسائل به طور بهینه و رسیدن به هدف مورد نظر با توجه به شرایط موجود است [۸-۹]. برخی افراد مسائل را بهتر از بقیه حل می کنند؛ زیرا از راهبردهای حل مسئله مؤثرتری استفاده می کنند [۱۰]. این مهارت برای هر فرد طراح، شخصی که یک طرح را تولید می کند، مهم و ضروری است. بدیهی است که استعداد و توانایی شکوفاسازی آن در حل مسئله مهم است. با این حال، مهارت حل مسئله از طریق آموزش، تجربه، و تفکر ارتقا می یابد [۱۱].

حل مسئله تخصصی یکی از مهارت های مهم در همه رشته های تحصیلی و زمینه های شغلی می باشد. تقویت این مهارت برای همه افراد ضروری است؛ زیرا مسائل مختلفی در هر شغلی بروز نموده که باید به درستی و به موقع حل شوند [۱]. این مهارت به خصوص در طراحی دارای اهمیت بالایی می باشد؛ چرا که اولین مرحله در انجام هر فعالیتی، مرحله طراحی است و موفق شدن در آن فعالیت مستلزم ارائه یک طرح مناسب است [۲]. طراحی فرایندی است که در آن یک طرح برنامه ریزی، تدوین، یا توسعه می یابد تا یک مسئله حل شود و یا یک نیاز خاص برآورده شود [۳-۴]. این فرآیند شامل فعالیت های مختلفی مانند ایجاد و توسعه ایده، رسم نقشه، انجام محاسبات، و انتخاب است. نتیجه فرآیند طراحی، طرح است. طرح شامل یک سری مشخصات از جمله نقشه، محاسبات، و یا برنامه هایی برای ارائه داده ها، اطلاعات، و دانش عمومی، فنی و تخصصی، و مهندسی برای تولید محصول، به شکل کالا یا خدمت است که باید کاربردی، قابل استفاده، قابل تولید، قابلیت تولید مجدد، ایمن، قابل اعتماد، رقابتی، و قابل فروش باشد. در تولید محصول، مرحله پیاده سازی بعد از مرحله طراحی قرار دارد. در این مرحله طرح به دست آمده باید به درستی در عمل اجرا شود تا محصول مورد نظر (کالا یا خدمات) تولید گردد. طراحی در هر شغلی لازم و ضروری است؛ اما در برخی موارد ممکن است مرز مشخصی بین فرآیندهای طراحی و پیاده سازی وجود نداشته باشد [۱-۲].

طراحی ماشین های مکانیکی شامل ابزارها، وسایل، ادوات، تجهیزات، و سامانه ها برای کاربردهای مختلف یکی از وظایف اصلی مهندسان مکانیک و مکانیک بیوسیستم است [۵]. از آن جا که برای طراحی هر ماشینی ابتدا باید قطعات مختلف آن شناخته و طراحی شوند، اولین درس طراحی که دانشجویان این رشته ها در دوره کارشناسی در دانشگاه فرا می گیرند، درس طراحی اجزاء ماشین است تا پس از آن دانشجویان برای طراحی ماشین های ویژه آماده شوند.

با توجه به اهمیت بالای مهارت حل مسئله و همچنین نقش درس طراحی اجزاء ماشین به عنوان یک برنامه درسی مهم و کاربردی در رشته های مهندسی مکانیک و مکانیک بیوسیستم، هدف از تحقیق حاضر مرور مراجع مختلف در زمینه آموزش طراحی اجزاء ماشین می باشد. علاوه بر جمع آوری مراجع مختلف در زمینه آموزش طراحی اجزاء ماشین، نوآوری تحقیق

۳- طراحی ماشین

تر با شکل، مقطع، و جنس مناسب؛ اما با اندازه کوچکتر و جرم سبک تر در طراحی ماشین ضروری است. با توجه به این، طراحی ماشین بر دو پایه استوار است: اول پایه نظری طراحی ماشین است که با شرکت در کلاس این درس، خواندن کتاب های درسی، و حل تکالیف و نمونه مسائل پوشش داده می شود. دوم موارد خارج از کتاب های درسی است و از طریق پروژه هایی با تمرکز بر تولید ایده، طراحی مفهومی، و مسائل ایمنی تکمیل می شود. طراحی بازنمایی های روز و واگذاری مسئولیت به دانشجویان آمادگی لازم را برای تجربه مهندسی را در عمل که دانشجویان در طول دوره های تکمیلی طراحی و بعد از فارغ التحصیلی در صنعت و جامعه به آن نیاز دارند، می دهد.

۴- درس طراحی اجزاء ماشین

درس طراحی اجزاء ماشین به عنوان یک دوره مقدماتی شامل اصول نظری ساختار، طراحی عملی، و دانش لازم برای مهندسی مکانیک و مکانیک بیوسیستم برگزار می شود. هدف این دوره آشنایی دانشجویان با فرآیندهای تحلیل پیشرفته ساختار و حل مسائل مهندسی نظری و عملی در طراحی قطعات اصلی ماشین است. در این درس برخی از اجزاء ماشین در مراحل مختلف طراحی مورد مطالعه قرار می گیرند. این بحث شامل وابستگی های متقابل و تعامل فرآیندهای طراحی، طراحی متوالی^۱ و مهندسی همزمان^۲ است. در طراحی متوالی مراحل به صورت مقطعی و در طول هم قرار دارند؛ اما در مهندسی همزمان مراحل مختلف به صورت همزمان اجرا می شوند. مهندسی همزمان زمان توسعه محصول و همچنین زمان عرضه به بازار را کاهش می دهد که منجر به بهبود بهره وری و کاهش هزینه ها می شود. ملاحظات طراحی مانند عملکرد، استحکام، تغییر شکل ها، و سختی پوشش داده می شود. معادلات و محاسبات برای تعیین مقادیر تنش ها، تغییر شکل ها، و تحلیل های خستگی اجزاء مختلف ماشین به منظور جلوگیری از شکست آن ها ناشی از بارگذاری استاتیک و تغییر بارگذاری در زمان و راه های پیشگیری از چنین شکستی هایی بحث قرار می گیرند. هر چند نرم افزارهای مختلف طراحی برای پیشگیری از شکست مورد بحث قرار می گیرد؛ اما مطالب نظری مربوط به چگونگی ممانعت از چنین شکست هایی برای طراحی ایمن اجزاء ماشین تدریس می شود.

هدف از فرآیند طراحی ایجاد یک اثر، برآوردن یک نیاز، هدف، و یا محدودیت، حل یک مسئله از طریق ساخت یک کالا، و یا اجرای یک فعالیت یا فرآیند خدماتی است [۲]. طراحی یک عملیات پیچیده است و دارای جنبه ها و الزامات مختلفی است که باید به درستی عملاً مدیریت شوند. بنابراین، طراحی به دانش، مهارت ها، و ابزارهای متفاوتی نیاز دارد. فرآیند طراحی مستلزم برخی مهارت ها و توانایی های شخصی از جمله، توانایی های ذهنی، خلاقیت، هنر، مهارت حل مسئله، و ارتباطات همراه با دانش و اطلاعات عمومی از جمله دروس پایه (ریاضیات، آمار، رایانه، و گرافیک) و زبان های ملی و بین المللی است. سایر الزامات طراحی شامل دانش تخصصی، صلاحیت تخصصی، و توانایی کار با نرم افزارهای تخصصی در زمینه مورد نظر است [۲]. ابزارهای طراحی و نرم افزارهای رایانه ای نقش اصلی را در فرایند طراحی دارند؛ زیرا علاوه بر کمک به طراحی دقیق تر طرح ها، سرعت طراحی را نیز افزایش می دهند [۱]. فرایند طراحی شامل برخی محاسبات تخصصی است. در دانشگاه ها، طراحان محاسبات تخصصی فرآیند طراحی در رشته خود را یاد می گیرند. علاوه بر این، طراحان باید دارای مسئولیت پذیری بالایی بوده و اخلاق حرفه ای خود را به خوبی تقویت کنند [۳].

طراحی دارای چهار مرحله اصلی از آغاز (شناسایی نیاز) تا انتها (برآوردن نیاز) است. مراحل اصلی طراحی شامل طراحی پیش تولید، طراحی حین تولید، طراحی پس از تولید، و باز طراحی است [۱۱]. طراحی پیش تولید شامل مراحل فرعی مختلفی از جمله تعیین هدف، تجزیه و تحلیل، پژوهش، تعریف هدف، حل مسئله، ارزیابی، بهینه سازی، و ارائه طرح است. طراحی حین تولید شامل آزمون و توسعه بوده و طراحی پس از تولید شامل پیاده سازی و ارزیابی است. در برخی موارد، مرحله باز طراحی ضرورت می یابد که در آن کل یا بخشی از طرح مجدد طراحی می شود [۲].

ماشین هر وسیله ای است که کار انجام می دهد. محور، چرخ دنده، یاتاقان های لغزشی و غلتشی، و بست ها و اتصالات (دائمی و موقت) اجزا ضروری ماشین هستند. تسمه، زنجیر، کلاچ، ترمز، و غیره سایر اجزاء ماشین هستند. جنبه های مختلف طراحی ماشین شامل تغییر شکل های مجاز، شرایط کاری ماشین، سرعت بحرانی، و پیچش است که نیازمند تصمیم سازی درستی هستند. تصمیم سازی در مورد چگونگی طراحی یک قطعه محکم

² Concurrent engineering¹ Sequential design

۴-۱- پیش نیازها و دانش پایه

۴-۲- مطالب درسی

طراحی اجزا ماشین به دانش اساسی مهندسی نیاز دارد. از این رو دانشجویانی که وارد این دوره می‌شوند باید دوره‌های مربوطه را برای آشنایی با مفاهیم اساسی پیش نیاز طراحی طی کنند. اولین مفهوم اصلی، خواص مواد است که مقدمه انتخاب نوع ماده است. درک خواص مختلف یک ماده که در نتیجه فرآیندهای مختلف تولید می‌شود، مهم است. فلزات آهنی و غیر آهنی و مواد مصنوعی مانند پلاستیک و کامپوزیت برخی از مواد مورد استفاده برای ساخت اجزاء مختلف ماشین هستند. دومین مفهوم اصلی مرتبط با بارها و نیروهای داخلی و نحوه تحلیل اجزاء و سازه‌ها است. باید ساختارهای اصلی طراحی ماشین معرفی شده و بارها و تنش‌های موجود تحلیل شوند. بنابراین باید ابتدا بارهای وارد بر اجزا ماشین مشخص و سپس به نمودارهای پیکره آزاد، تغییرات بارها در طول زمان و جهت، تعادل بارگذاری، و نیروهای داخلی و بارگذاری چندجهته و تنش‌های سه بعدی ناشی از چنین بارگذاری‌هایی مورد بحث قرار گیرد. سازه‌های اساسی پوشش داده شده عبارتند از میله مستقیم، تیر، و محور. این ساختارهای اساسی با معرفی قاب‌های ساده دو بعدی دنبال می‌شود. هر یک از این ساختارها در هر دو حالت معین و نامعین ارائه می‌شوند. مفاهیم ستون‌ها و پایداری الاستیک نیز مهم است. محور در دو صفحه تحلیل می‌شود. نیروهای داخلی مانند گشتاورها، نیروهای برشی، و عمودی، و تغییر شکل‌های خطی و زاویه‌ای باید فرا گرفته شود. مفاهیم انرژی مانند انرژی کرنش و انرژی اعوجاج که برای محاسبه تنش‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد باید معرفی شوند. باید تغییر مقاومت قطعه با تغییر شکل، مقطع، و جنس آن نیز مورد بحث قرار گیرد. سومین مفهوم اصلی بر نیروهای داخلی، تنش‌ها، و کرنش‌های ناشی از نیروهای عمودی و جانبی در مقابل پیچش تمرکز دارد. بنابراین، پیش نیازها شامل دروسی از جمله ریاضیات، فیزیک، نقشه کشی، استاتیک، مقاومت مصالح، و علم مواد است. همچنین از آن‌جا که طراحی ماشین فقط مربوط به اجزاء استاتیکی نیست و نیاز است همه جنبه‌های آن در نظر گرفته شود؛ بنابراین آشنایی با درس دینامیک، ارتعاشات، مکانیک سیالات، و انتقال حرارت نیز ضروری هستند. همچنین این دوره شامل دانش مقدماتی است که با مرور اصول نظری طراحی مکانیکی بر اساس دستاوردهای ریاضیدانان، فیزیکدانان، و مهندسان برجسته قرون گذشته و نتایج تجربی محققان اخیر مانند اویلر، گودمن، گربر، سادبرگ، لانگر، هرتز، و باکینگهام به دست می‌آید [۱۲].

۵- تدریس طراحی اجزاء ماشین

مطالب درسی هر رشته تحصیلی باید با دقت بالایی انتخاب شوند؛ چرا که دوره تحصیلی دارای محدودیت زمانی بوده و نمی‌توان همه مطالب را در دروس نیمسال‌های مختلف گنجاند. بنابراین برای هر درس تنها مطالب گزیده‌ای تدریس خواهد شد. مطالب درس طراحی اجزاء ماشین با تدریس، خواندن کتاب‌های درسی، تکالیف، و پروژه‌های طراحی پوشش داده می‌شود. سه کتاب برای این دوره مناسب است: دویچمن [۱۳]، نورتون [۱۴]، و شینگلی [۳]. متن کتاب دویچمن ساده است و توضیحات خوبی در مورد اصول دارد؛ اما هیچ مطلبی در مورد آزمایش‌های مدرن و نمونه‌های طراحی پیچیده ندارد. کتاب نورتون موارد عالی از طراحی عملی را ارائه می‌دهد؛ اما در برخی موارد توضیحات نظری واضحی ندارد. کتاب شینگلی هم اصول نظری مناسبی را ارائه می‌دهد و هم نمونه‌های عملی. بنابراین، کتاب شینگلی می‌تواند به عنوان مرجع درسی دوره انتخاب شود. در تدریس درس طراحی اجزاء ماشین، نیاز است ابتدا دانشجویان با اجزاء مختلف ماشین مانند محور، خار و هزارخاری، پیچ، فنر، یاتاقان، تسمه، زنجیر، چرخنده، کلاچ، ترمز، و غیره به خوبی آشنا شوند. از آن‌جا که این کتاب‌ها معمولاً طرح‌واره‌ای از این اجزاء را ارائه می‌دهند، بنابراین نیاز است علاوه بر مشاهده تصاویر واقعی آن‌ها، دانشجویان باید طی یک یا چند جلسه این اجزا را در کارگاه‌ها ببینند و با عملکرد آن‌ها آشنا شوند.

تدریس درس طراحی اجزاء ماشین بر سه پایه استوار است: اول طراحی مفهومی اختراعی اجزاء و مکانیزم‌های ماشین، دوم اصول نظری تحلیل اجزاء بر اساس نظریه‌های کلاسیک و رویکردهای طراحی جدید، و سوم برقراری ارتباط بین مفاهیم طراحی و تحلیل به جدیدترین ماشین‌ها و سازه‌های موجود. مسائل متعددی که در تدریس و یادگیری در این دوره مد نظر قرار می‌گیرند باید بتوانند بین قضا و روش‌های اساسی کاربرد مهندسی مکانیک با استفاده عملی در طراحی اجزاء ماشین ارتباط برقرار شود.

تدریس باید به گونه‌ای باشد که دانشجویان برای انجام پروژه طراحی محور آماده شوند. ابتدا مفاهیم اصلی از طریق مسائل مربوط به تنش و قابلیت اطمینان، احتمال شکست، و ایمنی آموزش داده می‌شود. سپس مفاهیم کلی طراحی هندسی، ابعاد، واحدها، و لقی‌ها پوشش داده می‌شود. الزامات طراحی،

۶-۱- تولید ایده

ایده یک تصویر، اندیشه، یا تصور کلی و خام در ذهن است. با کار بر روی ایده، یک مفهوم اولیه به دست می آید. در واقع، ایده نقطه آغاز مفهوم اولیه است. مفهوم اولیه یک فکر ذهنی برای توسعه یک طرح است که بر اساس یک ایده؛ اما دقیق تر و جزئی تر از آن بوده تا منجر به دستیابی به هدف مورد نظر گردد [۲]، ۱۶-۱۵. پس از به دست آمدن مفهوم اولیه، یک طرح جدید می تواند طراحی شود. بنابراین تولید ایده به عنوان مرحله آغازین طراحی طرح های جدید برای حل مسائل دارای اهمیت بالایی می باشد.

در بحث تولید ایده، دانشجویان می توانند ایده ای از یک ماشین یا قطعه ای از آن ها را برای حل یک نیاز ایجاد کنند. این ماشین می تواند مکانیکی یا مکترونیکی باشد که در هر صورت کل یا بخشی از آن در زمینه درس طراحی اجزاء ماشین باشد تا دانشجویان بتوانند به صورت مسئله محور از این درس بهره ببرند. علاوه بر این، این ایده می تواند یک محرک برای افزایش انگیزه دانشجویان و ورود آن ها به دنیای واقعی طراحی و ساخت برای پاسخ به مسائل مختلف باشد.

۶-۲- ملاحظات ایمنی

ایمنی حالت محافظت از صدمات و خطرات است. خطرات در حوزه های مختلف یکسان نیستند؛ گاهی خطر به آسیب به انسان ها، حیوانات، و محصولات، گاهی به خرابی وسایل مکانیکی و برقی، و گاهی به ضرر اقتصادی اطلاق می شود. ملاحظات ایمنی در طراحی اجزاء ماشین به اطمینان در برابر شکست (جداشدن، ترک برداشتن، تغییر شکل ماندگار، پوسته پوسته شدن، سایش، و خوردگی) اشاره دارد که با عنوان ضریب اطمینان، ضریب ایمنی، و یا عامل طراحی بیان می شود [۳]. ملاحظات ایمنی یک موضوع اصلی در درس طراحی اجزاء ماشین است که باید دانشجویان به خوبی آن را فرا گیرند؛ چرا که ایمنی عامل اصلی کیفیت محصول بوده و محصولات باید به خوبی طراحی و پیاده سازی شوند تا به ضریب ایمنی بالایی برسند و از خرابی و نقص اولیه در آن ها جلوگیری شود و با ایمنی بالایی کار کنند [۲]. با بازرسی و مستند سازی اجزا نا ایمن ماشین ها، دانشجویان می توانند ایمنی یک ماشین را

مشخصات، و وابستگی های متقابل موضوعات طراحی آخرین مطالبی هستند که تدریس می شود. موضوع اجتناب از تمرکز تنش در اجزاء با طراحی مناسب آن ها باید فرا گرفته شود. سپس باید تنش های صفحه ای و تغییر شکل به نمایش سه بعدی و محاسبات مربوطه تبدیل گردد. از آن جا که اکثر اجزاء ماشین متحرک هستند، آشنایی با مسائل دینامیکی نیز مهم است. پس از معرفی تنش ها و تغییر شکل های دینامیکی، باید موضوع خستگی مطرح شود. وقتی دانشجویان این مفاهیم را یاد گرفتند، آماده تحلیل یک ماشین ساده می شوند. ورود دانشجویان به چنین مفاهیم پیچیده و نتیجه گیری های ریاضی و گرافیکی منجر به چالش های زیادی در طول دوره می شود که می تواند شروع خوبی برای یادگیری مطالب مربوط به طراحی سایر اجزاء ماشین شود.

۶- مولفه های درس طراحی اجزاء ماشین

مطالب آموزش داده شده برای درس طراحی اجزاء ماشین باید فراتر از کتاب های درسی باشد. موارد اضافه شده که فراتر از تحلیل ساختاری هستند، درک بهتری از مسائل مهندسی را در طول دوره های بعدی طراحی و بعد از فارغ التحصیلی به ارمغان می آورند. چنین دوره ای رضایت بیشتری برای دانشجویان در طول فرآیند یادگیری ایجاد کرده و مزایای شناختی بیشتری حین انجام عملی کارهای مهندسی دارد. الگوی یادگیری مهم است و می تواند چه در حل مسئله به صورت گروهی و چه در تجربیات طراحی در تقویت مهارت حل مسئله دانشجویان مفید باشد. در این راستا، بزیمک [۱۲] رویکرد طراحی مبتکرانه ای برای درس طراحی اجزاء ارائه داده اند و بیان کردند که با وجود این مولفه ها، تجربه یادگیری این دوره با وجود دشواری های زیاد آن جذاب است [۱۲].

در درس طراحی اجزاء ماشین علاوه بر دانش اولیه از تحلیل تنش و تغییر شکل و دانش طراحی هندسی، باید تولید مفهوم مبتکرانه نیز در دانشجویان ارتقا یابد. بر اساس این سه مولفه، فلسفه طراحی اجزاء ماشین ایجاد می شود و سپس توسعه می یابد [۱۲]. بنابر این، به منظور تقویت مهارت حل مسئله دانشجویان در درس طراحی اجزاء ماشین، این دوره باید علاوه بر محتوای کتاب های درسی شامل پنج مولفه اصلی باشد: تولید ایده، ملاحظات ایمنی، طراحی روز^۱ (DoD)، تقویت مسئولیت پذیری، و انجام پروژه نیز باشد.

^۱ Design of the day

بررسی و راه کارهایی را به منظور بهبود ایمنی آن ارائه و نهایتاً گزارش آن را آماده کنند [۱۲].

۶-۳- طراحی روز مهندسی مکانیک

در بحث طراحی روز، دانشجویان باید ماشین های معمولی و پیشرفته موجود را با استفاده از منابع مختلف یا تجربه کارآموزی صنعتی خود ارائه دهند. در طراحی روز، دانشجویان دانش نظری و عملی طراحی خود را به دستاوردهای صنایع مرتبط می کنند. به عنوان بخشی از آموزش طراحی اجزا ماشین، دانشجویان می توانند که یک سمینار کوتاه در حد ۱۰ دقیقه در مورد طراحی یک ماشین یا وسیله مکانیکی آماده کنند. اهداف از این ارائه این سمینار عبارتند از: الف) روشن ساختن اینکه چگونه نوآوری طراحی در عمل رخ می دهد، ب) کسب تجربه در ارائه شفاهی موضوعات طراحی ماشین، و ج) دانشجویان دانش مفیدی را در مورد طراحی ماشین ها یا وسایل خاص با اشاره به مکانیک و عملکرد آن جمع آوری کنند. این ارائه مختصر و در حد ۱۰ دقیقه می باشد. موضوع سمینار می تواند محصولات ساخته شده یا طرح های جدید باشد. جالب ترین جنبه ارائه طراحی روز چگونگی ظهور طرح است. آیا طرح حاصل تحلیل یا آزمایش های جدید بوده است؟ آیا بر اساس بهره برداری از مواد یا فناوری های جدید بوده است؟ آیا نوآوری طراحی در تکمیل یک وسیله موجود بوده یا یک وسیله کاملاً جدید طراحی شده است؟ دانشجویان باید در مورد طراحی کلی و اختصاصی ماشین های انتخاب شده و فرمول های طراحی مربوطه بحث کنند. دانشجویان تشویق می شوند تا علاقه، تجربه، و استعداد های مبتکر خود را نشان دهند. برخی سمینارها می تواند در مورد معرفی برخی از اجزا ماشین ها مانند ترمز ABS، چگونگی کارکرد آن ها، و نیروهایی درون آن ها است. دانشجویان باید در مورد دلیل و چگونگی طراحی آن ها نظر بدهد و می تواند راه هایی را برای بهبود طراحی آن ها پیشنهاد دهند [۱۷]. علاوه بر این موارد، ارائه یک موضوع در سر کلاس می تواند یک آغاز برای تقویت ارتباطات دانشجویان باشد.

به طور کلی سمینارها را می توان به دو گروه تقسیم کرد. اولین مورد توجه کلاس را به این واقعیت جلب می کنند که محصولات مهندسی مکانیک مدرن نتایج چندین طرح هستند: مکانیک، برق، و علوم رایانه [۱۷]. چنین طراحی هایی نیاز به دانش مکترونیک دارد. هنگامی که طراحی روز سامانه بزرگی مانند یک هلیکوپتر جدید مد نظر باشد، طراحی مکانیکی پیشرو است. در طراحی یک دست مصنوعی، رویکرد متفاوت است. این سامانه نتیجه طراحی مکانیکی در دانش پایه برق است. گروه دوم

سمینارها شامل ابزارهای مکانیکی مورد استفاده در زندگی روزمره مانند منگنه زن، قوطی بازکن، و ... است که نیازمند طراحی مفهومی مانند انتقال به بعد دیگر، سامانه های اتصال، و استفاده از فناوری نانو است [۱۸]. در مسائل روز، دانشجویان می توانند نه تنها طرح کلی، بلکه محاسبات اولیه طراحی را نیز ارائه دهند تا امکان سنجی پیاده سازی طرح را اثبات کنند.

نکته مهم دیگر این است که در طراحی روز مهندسی مکانیک دانشجویان باید با قطعات موجود در بازار آشنا شوند. در طراحی اجزاء ماشین، آشنایی طراحان با قطعات موجود در بازار ضروری است؛ چرا که در ساخت یک ماشین تا آن جا که ممکن است باید از قطعات موجود در بازار استفاده کرد؛ زیرا خرید قطعات موجود از نظر زمانی و اقتصادی به صرفه تر از ساخت آن ها است.

۶-۴- درک مسئولیت

مسئولیت به مسئولیت پذیری تولیدکنندگان در قبال هرگونه آسیب و صدمه ای که به دلیل نقص در محصولات تولید شده توسط آن ها به مصرف کننده می رسد، اشاره دارد [۱۹]. در طراحی واقعی باید طراح دارای مسئولیت پذیری بالایی بوده و اخلاق حرفه ای خود را در دوران تحصیل و قبل از شروع به کار به خوبی تقویت کنند [۲، ۲۰]. گارانتی و وارانتی نشان دهنده مسئولیت پذیری بالای تولیدکنندگان است. گارانتی تعهد شفاهی تولیدکنندگان به مصرف کنندگان است مبنی بر اینکه محصول (کالا و خدمات) را در صورت پایین بودن کیفیت مشخص شده برای آن، تعمیر یا تعویض نموده و یا هزینه آن را پس می دهند؛ اما وارانتی تضمینی کتبی برای نشان دادن حقیقت در مورد کالا است و در صورتی حقیقت نداشته باشد، تعمیر یا تعویض می شود [۲، ۲۱].

در طراحی، ساخت، بازاریابی، و فروش محصولات، زمانی که آسیبی در اثر استفاده از محصول تولیدی رخ دهد، طراح با نگرانی های جدی در مورد مسئولیت های قانونی خود مواجه خواهد شد. برخی از نگرانی ها به خوبی پایه ریزی شده و برخی نیز از عدم درک اصول حقوقی ناشی می شود. بنابراین باید دانشجویان با برخی از این اصول آشنا شوند. در این راستا، باید دانشجویان با مفاهیم مسئولیت، ضمانت و انواع گارانتی آشنا شوند. بحث مسئولیت پذیری به پاسخ دهی قانونی طراح در مورد محصول معیوب که سبب وارد آمدن صدمه یا حادثه به مصرف کننده می شود، می پردازد. در این مورد، دانشجویان جنبه های اجتماعی طراحی و ساخت را یاد می گیرند. باید موارد قانونی مسئولیت تولید کنندگان و طراحان به دانشجویان ارائه شود و پیامدهای

کتاب درسی به این منظور، کتاب طراحی مهندس مکانیک شیگلی می باشد. حل تکالیف کتاب درسی مذکور و آزمون های نوشتاری نیز ضروری می باشد؛ زیرا نشان می دهد که دانشجویان دانش بنیادی در مورد طراحی اجزاء ماشین را کسب کرده اند و می توانند آن را در دنیای چالش برانگیز موقعیت های عملی مهندسی به کار ببرند. علاوه بر این ها، دوره آموزشی طراحی اجزاء ماشین باید شامل پنج مولفه اصلی باشد: ۱- تولید ایده، ۲- ملاحظات ایمنی، ۳- طراحی روز، ۴- تقویت مسئولیت پذیری، و ۵- انجام پروژه. در بخش تولید ایده دانشجویان می توانند به صورت مسئله محور ایده ای از یک ماشین یا قطعه ای از آن را برای حل یک نیاز ایجاد کنند که می تواند محرکی برای افزایش انگیزه دانشجویان و ورود آن ها به دنیای واقعی طراحی و ساخت باشد. در بخش ملاحظات ایمنی دانشجویان می توانند اجزاء نا ایمن ماشین ها را شناسایی و تحلیل و راه کارهایی را به منظور بهبود آن ارائه دهند. در بخش طراحی روز دانشجویان با ماشین های معمولی و پیشرفته و قطعات موجود در بازار آشنا شده و با ارائه یک سمینار راجع به یکی از آن ها در سر کلاس در حد ۱۰ دقیقه، می تواند آغازی برای تقویت ارتباطات دانشجویان با بازار، صنعت، و جامعه باشد. در رابطه با مسئولیت پذیری، دانشجویان باید با اهمیت عملکرد، استفاده، و دفع نهایی محصول و قوانین مربوط به مسولیت طراحی آشنا شوند. در بخش پروژه به عنوان یک فعالیت تکمیلی مانند طراحی یک محور دورانی تحت محدودیت های معین که در کتاب مهندس مکانیک شیگلی نیز مشابه چنین مسئله ای مطرح شده است، آماده است، آمادگی دانشجویان برای طراحی اجزاء ماشین در محل کار را بهبود می بخشد. با در نظر گرفتن این موارد در دوره آموزشی درس طراحی اجزاء ماشین، دانشجویان علاوه بر فرا گرفتن طراحی اجزاء ماشین با جنبه های مختلف طراحی به صورت مسئله محور آشنا می شوند و اهمیت و نقش طراحی در حل مسائل را درک کرده و علاوه بر توییت مهارت حل مسئله آن ها می تواند پایه ای قوی و محرک مهمی برای ورود آن ها به طراحی واقعی و ساخت محصول با رویکرد حل مسئله باشد.

۸- مراجع

- [1] Kheiralipour, K., Introducing problem-solving components with emphasis on design thinking approach 14th National Congress of Mechanical Engineering of Biosystems and Mechanization, Kermanshah, Iran, 6-8 September, (2022a). (In Persian)

اجتماعی و مالی آن مورد بحث و بررسی و چندین مورد از عواقب شکست محصول و صدمات ناشی از آن مورد بحث قرار گیرد [۲۲]. دانشجویان باید مقدمه ای از مسئولیت پذیری طراح در مورد عملکرد، استفاده، و دفع نهایی محصول بنویسند. آن ها باید در مورد قابلیت اعتماد و ایمنی محصول، اصول قانونی که بر اساس آن پرونده ها تحت پیگرد قرار می گیرند، و مسئولیت های طراح بنویسند. چک لیست ایمنی محصول نیز باید مورد بحث قرار گیرد.

۶-۵- انجام پروژه

علاوه بر امتحانات نوشتاری در طول یا پایان نیمسال تحصیلی، پروژه درسی یک فعالیت تکمیلی به منظور تکمیل یادگیری دانشجویان در دوره درس طراحی اجزاء ماشین است. در واقع، انجام یک پروژه برای درس طراحی اجزاء ماشین توسط دانشجویان نشان دهنده یادگیری این درس توسط آن ها و آمادگی آن ها برای طراحی اجزاء ماشین در محل کار است. برای هر قسمت از موضوعات طراحی، می توان پروژه درسی متناسب ارائه شود و بخشی از نمره درسی به آن اختصاص یابد. با این حال، طراحی یک محور دورانی تحت محدودیت های معین که در کتاب مهندس مکانیک شیگلی نیز مشابه چنین مسئله ای آمده است، به عنوان یک پروژه کامل و جامع برای این درس مفید است و می تواند برای دانشجویان در نظر گرفته شود؛ چرا که این پروژه عملاً یک طراحی مهندسی واقعی برای آن ها است [۱۲].

۷- نتیجه گیری

حل مسئله تخصصی مهارت مهمی برای همه افراد با هر شغلی به خصوص افراد با تحصیلات دانشگاهی در همه رشته تحصیلی است. علاوه بر این که مهارت حل مسئله تخصصی نیز همانند حل مسئله عمومی وابسته به توانایی های شخصی افراد است، آموزش می تواند در تقویت این مهارت نقش بسیار موثری داشته باشد. طراحی ماشین یا اجزاء و قطعات آن یکی از مهمترین تخصص های رشته های مهندسی مکانیک و مکانیک بیوسیستم است که دانشجویان می توانند در حین تحصیل آن را به خوبی فراگیرند. تدریس درس طراحی اجزاء ماشین به عنوان یکی از مهم ترین دروس رشته های مهندسی مکانیک و مکانیک بیوسیستم با محوریت تقویت مهارت حل مسئله نیازمند تدریس کتاب درسی با محتوای درسی مناسب و کافی است که بهترین

- [14] Norton, R.L., Machine Design: An Integrated Approach, 3rd Ed., New Jersey: *Prentice Hall*, (2006).
- [15] Andreasen, M.M., Hansen, C.T., Cash, P., Conceptual Design: Interpretations, Mindset and Models, 1st Ed., Aargau: *Springer International Publishing*, (2015).
- [16] Paulin, M.A., The Idea Is...: A book for turning ideas into companies, 1st Ed., South Carolina: *CreateSpace Independent Publishing Platform*, (2014).
- [17] McCall C., Bzymek, Z.M., Solving koffee karousel design problems, A case study in the senior mechanical engineering design student project, IMECE2015-52499 Draft Paper, *Proceedings of the ASME 2015 Mechanical Engineering Congress and Exposition IMECE 2015*, Houston, Texas, November 13-19 (2015).
- [18] Bzymek, Z.M., New principles in conceptual product design using BTIPS, proceedings of the fifth international workshop on advanced manufacturing technologies, London, Canada, (L. Wang and X.Y. Liu, eds.), *Sponsored by National Research Council of Canada-Integrated Manufacturing Technologies Institute*, pp. 105–110, (2005).
- [19] Koziol, H., Green, M.D., Lunney, M., Oliphant, K., Yang, L., Production liability: fundamental questions in a comparative perspective, Berlin: *de Gruyter*, (2018).
- [20] Alqahtani, A.Y., Kongar, E., Pochampally, K.K., Gupta, S.M., Responsible Manufacturing, 1st Ed., New Jersey: *CRC Press*, (2021).
- [21] Murthy, D.N.P., Blischke, W.R., Warranty management and product manufacture, Springer-Verlag, London, UK. Ochsner, A., Altenbach, H., Engineering Design Applications II., 1st Ed., Aktiengesellschaft: *Springer Nature*, (2020).
- [22] Weinstein, A.S., Twerski, A.D., Piehler, H.R., Donaker, W.A., Product liability and reasonably safe product: A guide for management, design and marketing, 1st Ed., Stuttgart: *Macmillan Publishin*, (1975).
- [2] Kheiralipour, K., Sustainable Production, Definitions, Aspects, and Elements, 1st Ed., New Yourk: *Nove Science Publishers*, (2022b).
- [3] Budynas, R.G., Nisbett, J.K., Shigley's Mechanical Engineering Design, 10th Ed., New York: *McGraw-Hill Education*, (2014).
- [4] Ochsner, A., Altenbach, H., Engineering Design Applications II. 1st Ed., Aktiengesellschaft: *Springer Nature*, (2020).
- [5] Kheiralipour, K., Rafiee, S., Agah, M., The necessity and importance of the biosystems engineering academic fields, 13th *National Congress of Mechanical Engineering of Biosystems and Mechanization*, Tehran, Iran, September 15-17 (2021). (In Persian)
- [6] Johnson, D.M., Parrott, G.R., Stratton, R.P., Production and judgment of solutions to five problems, *Journal of Educational Psychology Monograph*, Vol. 59, (1968).
- [7] Smith, M.U., A view from biology, In M.U. Smith. Toward an untied theory of problem solving, New Jersey: *Lawrence Erlbaum Associates*, (1991).
- [8] Amirhosseini, K., Problem Solving Skills, (Translated), 1st Ed., Tehran: *Aref Kamel Publication* (2011). (In Persian)
- [9] Zare, H., Moradi, L., Problem Solving, (Translated). 2nd Ed., Tehran: *Nasle NowAndish Publication* (2020). (In Persian)
- [10] Singley, M.K., Anderson, J.R., The transfer of cognitive skill. Cambridge: *Harvard University Press*, (1989).
- [11] Ullman, D.G., The Mechanical Design Process, 4th Ed., New York: *Mc Graw Hill*, (2009).
- [12] Bzymek, Z.M., Hinkle, S.S., Jurado Quiroga, Z.E., Problem solving in design of machine elements in mechanical engineering, *Proceedings of the ASME 2015 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. November 13-19, Houston, Texas, US, (2015).
- [13] Deutschman, A.D. Michaels, W.J., Wilson, C.E., Machine Design, Theory and Practice, 1st Ed., Stuttgart: *Macmillan Publishing*, (1975).

تحلیل کمانش ساندویچ پانل کامپوزیتی مورد استفاده در سازه کلاهک محافظ ماهواره

اورحان کریمی

کارشناسی ارشد،
مهندسی مکانیک

جواد علیزاده کاکلر*

دانشیار،
دانشکده فنی،
دانشگاه ارومیه، ارومیه

چکیده: هدف در این مقاله، تحلیل کمانش ساندویچ پانل کامپوزیتی مورد استفاده در سازه کلاهک محافظ ماهواره و بررسی اثر عوامل مختلف بر کمانش این سازه به روش اجزا محدود است. به این منظور، ابتدا نتایج تحلیل کمانش پانل با هسته لانه زنبوری آلومینیومی و رویه کربن/اپوکسی با نتایج تجربی موجود در مقالات مقایسه و مدل اجزا محدود صحت گذاری شده است. سپس تاثیر ضخامت هسته و رویه، جنس و ساختار هسته، هیبریدی بودن رویه ها و چیدمان رویه ها بر نیروی بحرانی کمانش پانل مورد بررسی قرار گرفته است. پانل کامپوزیتی به صورت قطعی یک شانزدهم از یک پوسته نازک استوانه ای مدلسازی و با استفاده از المان های آجری خطی با اندازه شش میلیمتر المان بندی شده است. فرض شده است که پانل فاقد عیوب هندسی و ترک اولیه باشد. بر اساس تحلیل های انجام شده، پانل با رویه هیبریدی آلیاژ تیتانیوم و کربن/اپوکسی بهترین استحکام کمانشی را دارا بوده و ۷۸ درصد افزایش بار بحرانی کمانش نسبت به پانل اولیه را نتیجه می دهد.

واژه های راهنما: کمانش، کلاهک محافظ ماهواره، ساندویچ پانل کامپوزیتی، کامپوزیت های هیبریدی، حل اجزا محدود

مقاله مروری

دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۰۹

پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۱۳

Orhan Karimi
M.Sc.,
Mechanical Engineering

Javad Alizadeh
Kaklar*
Associate Professor,
Faculty of Engineering,
Urmia University,
Urmia

Buckling analysis of composite sandwich panels used in satellite payload fairing structure

Abstract: In this paper, buckling analysis of a composite sandwich panel used in payload fairing structure is done and effects of various parameters on the structure buckling are investigated using finite element method. To this end, first, finite element model is validated for an aluminum honeycomb core and carbon/epoxy facesheets by the experimental results presented in literatures. Then, the effect of various parameters such as the core and facesheets thicknesses, material and structure of core, hybrid composite facesheets and facesheets layouts on the critical buckling load of panel is investigated. The composite panel is modeled as a 1/16th sector of thin cylindrical shell and is meshed using 6 mm linear cubic elements. The panel is considered without initial geometrical imperfections and cracks. According to the results, panel with hybrid facesheets consisting of titanium alloy and carbon/epoxy has the best buckling strength, 78% increase in critical buckling load compared to the basic panel.

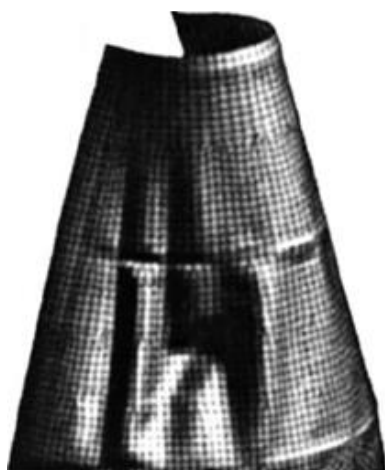
Keywords: Buckling, Satellite payload fairing, Composite sandwich panel, Hybrid composites, Finite elements solution

۱- مقدمه

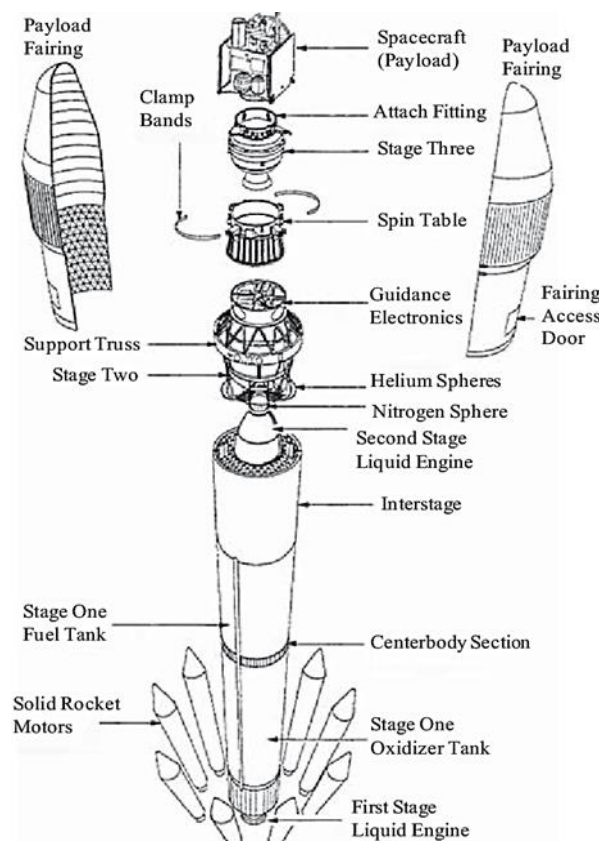
کمانش نوعی ناپایداری سازه‌ای است که در اثر اعمال نیروی فشاری اتفاق افتاده و منجر به شکست یا فروپاشی سازه می‌شود. کمانش در سازه‌های فضایی از اهمیت بالایی برخوردار است. از جمله سازه‌های فضایی، راکت پرتاب فضاپیما یا راکت ماهواره‌بر است که به منظور پرتاب و قرار دادن محموله هدف در مدار تعیین شده به کار می‌رود. این راکت‌ها از بخش‌های مختلفی مانند موتورهای موشکی، مخازن سوخت، سیستم‌های هدایت، ناوبری و کنترل، کلاهک محافظ، محموله (ماهواره، انسان و یا ...)، موتورهای موشکی اضافی برای افزایش نیروی پیش‌رانش و یک سازه اصلی که کلیه این عناصر را در خود جای می‌دهد، تشکیل شده‌اند (شکل ۱). با توجه به سرعت بالای ماهواره‌بر در طول فرآیند برخاست مافوق صوت، کلیه اجزای آن تحت تنش فشاری قرار داشته و لذا احتمال کمانش و شکست ناشی از آن وجود دارد. یکی از این اجزا که نقش بسیار مهم و حساسی را در حفاظت از محموله و موفقیت پروژه‌های فضایی ایفا می‌کند کلاهک محافظ است. کلاهک محافظ، از محموله در برابر فشار اتمسفری وارده در طول فرآیند صعود، گرمایش آیرودینامیکی و

محیط اکوستیکی خشن ناشی از سر و صدای آیرودینامیکی و صدای موتور جت محافظت می‌کند. همچنین این کلاهک به سازه، شکل آیرودینامیکی می‌دهد. مهمترین بارهای وارده به کلاهک محافظ، نیروی فشاری و خمشی ناشی از فشار آیرودینامیکی و نیروی اینرسی حاصل از شتاب حرکت است [۱]. هر چند قسمت مخروطی کلاهک محافظ نیز در معرض کمانش قرار دارد (شکل ۲)، ولی ایمنی آن نسبت به قسمت استوانه‌ای کلاهک با توجه به خواص هندسی مخروط، بیشتر است. در ساخت قسمت استوانه‌ای کلاهک محافظ، با توجه به این که وزن یکی از پارامترهای مهم در طراحی آن است، معمولاً از پوسته با ساختار ساندویچ پانل کامپوزیتی استفاده می‌شود. در ساندویچ پانل، ورق‌های رویه وظیفه تحمل بارهای خمشی درون صفحه‌ای و جانبی را بر عهده داشته و هسته بارهای برشی را تحمل می‌کند. ساندویچ پانل‌ها دارای عمر خستگی بالا، قابلیت تحمل درجه حرارت بالا، عایق خوب حرارتی و صوتی، خواص خوب آیرودینامیکی، قابلیت جذب انرژی بالا و مقاوم در برابر شوک‌های وارده هستند.

در زمینه کمانش سازه‌های ساندویچ پانل، تحقیقات زیادی صورت گرفته است. در سال ۱۹۸۷ مینگت و همکاران [۲]، تاثیر جنس و ضخامت هسته را بر رفتار پانل ساندویچی تحت فشار با رویه‌های گرافیت/اپوکسی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها در کنار تاثیر زیاد ضخامت و جنس هسته بر رفتار پانل‌های ساندویچی به این نتیجه رسیدند که کمانش پانل‌های نازک در مود اول و کمانش پانل‌های ضخیم در مود ترکیبی اول و دوم رخ می‌دهد. همچنین مود شکست در پانل‌های نازک به صورت شکست هسته و جدایش پوسته و هسته ولی در پانل‌های ضخیم به صورت شکست رویه مشاهده شد.



شکل ۲ کمانش قسمت مخروطی کلاهک محافظ ماهواره [۱]



شکل ۱ اجزای تشکیل دهنده نمونه‌ای از یک ماهواره‌بر [۱]

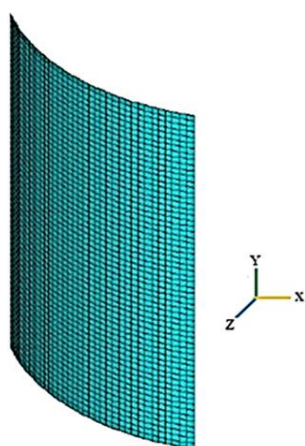
² Barrel section

¹ Payload Fairing

با توجه به مطالعات بسیار انجام شده در زمینه کمانش پانل‌های کامپوزیتی، تمرکز مطالعه حاضر بر کاربرد پانل کامپوزیتی در کلاhek محافظ ماهواره و بررسی تاثیر عوامل موثر بر استحکام کمانشی این پانل به منظور تعیین بهترین شرایط با استفاده از مدل عددی صحنه‌گذاری شده است. در این مطالعه تلاش بر این است تا ضمن بررسی تاثیر ضخامت هسته و چیدمان رویه‌ها بر نیروی بحرانی کمانش ساندویچ پانل کامپوزیتی، تاثیر هسته‌های فوم و لانه زنبوری و رویه‌های هیبریدی بر کمانش ساندویچ پانل با هدف ارتقای قابلیت تحمل بارهای فشاری این نوع از سازه‌ها ارزیابی شود.

۲- مدلسازی اجزای محدود و صحنه‌گذاری آن

در این مطالعه برای مدلسازی و تحلیل کمانش ساندویچ پانل کامپوزیتی از نرم افزار اجزای محدود آباکوس استفاده شده است. برای مدلسازی اجزای محدود پانل، با توجه به تقارن هندسی کلاhek محافظ در راستای محیطی و با هدف افزایش دقت نتایج و کاهش هزینه زمانی حل، قطاعی $22/5^\circ$ درجه از قسمت استوانه‌ای آن که معادل با یک شانزدهم کل استوانه به قطر ۱۰ متر است، انتخاب شده است. دلیل دیگر این انتخاب، امکان صحنه‌گذاری نتایج حل مدل اجزای محدود با نتایج ارائه شده در مرجع [۱۳] است. برای صحنه‌گذاری مدل اجزای محدود، از پانل با هسته آلومینیومی لانه زنبوری و رویه کربن/اپوکسی T300/5208 استفاده می‌شود. هندسه پانل به صورت پوسته استوانه‌ای سه بعدی به ارتفاع ۱۵۲۴ mm، شعاع ۵۰۰۰ mm و زاویه $22/5^\circ$ درجه در نظر گرفته شده است. در مدل اجزای محدود، محورهای x ، y و z به ترتیب به صورت محورهای طولی، محیطی و شعاعی لحاظ شده است (شکل ۳).



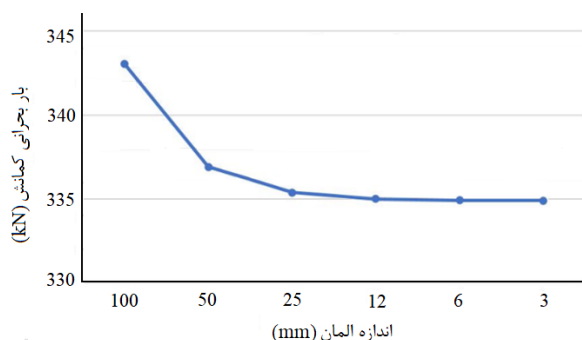
شکل ۳ مدل اجزای محدود ساندویچ پانل کامپوزیتی استوانه‌ای به همراه دستگاه مختصات دکارتی

کیم و هانگ [۳] در سال ۱۹۹۷ رفتار کمانشی و پس کمانشی ورق‌های کامپوزیتی را مورد مطالعه قرار دادند. در سال ۲۰۰۰، هاووز و همکاران [۴] اثر ناهمسانگردی رویه‌ها بر رفتار کمانشی و پس کمانشی پانل‌های ساندویچی تخت را تحت بارهای مکانیکی و حرارتی بررسی نموده و نشان دادند که خواص جهت‌دار رویه‌ها نقش بسزایی در افزایش مقاومت کمانشی و ظرفیت تحمل نیرو در محدوده پس کمانشی دارد. در ادامه، کامور و همکاران [۵] با بررسی پانل‌های کامپوزیتی رزین/شیشه دارای حفره بیضوی نتیجه گرفتند که وجود حفره منجر به کاهش نیروی کمانش شده و هر چه ابعاد حفره بزرگ‌تر باشد، تضعیف مقاومت کمانشی پانل بیشتر خواهد بود. همچنین، جهت‌گیری حفره بیضوی در ابعاد ثابت، بر مقاومت کششی پانل موثر گزارش شد.

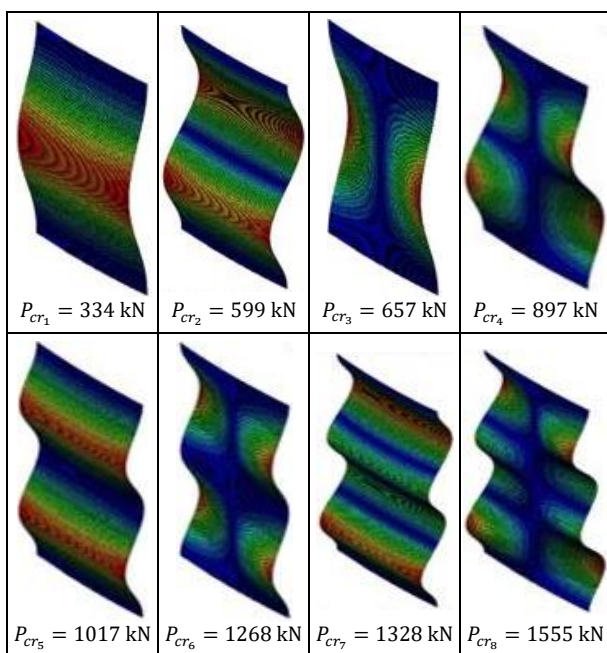
دهوبان و همکاران [۶] در سال ۲۰۱۷، تاثیر جهت‌گیری الیاف و نحوه چیدمان لایه‌ها بر رفتار کمانشی ورق‌های کامپوزیت هیبریدی کربن/بازالت را به صورت تجربی و عددی مطالعه کردند. آن‌ها دریافتند که جهت‌گیری الیاف در لایه بیرونی نقش پررنگی در قابلیت تحمل بار فشاری توسط ورق دارد. در سال ۲۰۱۹، رفتار پس کمانشی ساندویچ پانل‌های متشکل از هسته لانه زنبوری و رویه‌های نانوکامپوزیت تقویت شده توسط گرافن با فرض وجود عیوب هندسی مورد مطالعه قرار گرفت [۷]. در واقع، برای افزایش عملکرد مکانیکی ساندویچ پانل‌های لانه زنبوری آلومینیومی، استفاده از نانوکامپوزیت‌های تقویت شده توسط پلاکت‌های گرافن به عنوان رویه پیشنهاد شد. ژال و همکاران [۸] در سال ۲۰۲۱، با استفاده از تحلیل کمانش حرارتی ساندویچ پانل انحنا دار، اثر ویژگی‌های سازه پانل را بر دمای بحرانی کمانش مورد بررسی قرار دادند. اوپوا و همکاران [۹] با ساده‌سازی هسته لانه زنبوری یک ساندویچ پانل به صورت یک جامد توپر، جدایش ناشی از کمانش موضعی در رویه ساندویچ پانل را تخمین زدند. در سال ۲۰۲۲، آندراده و همکاران [۱۰] کمانش الاستیک خطی ساندویچ پانل نبشی شکل با شرایط مرزی مختلف را با هدف گسترش استفاده از ساندویچ پانل در صنعت مورد مطالعه قرار دادند. کلشتری و جلیوکا [۱۱] کمانش ساندویچ پانل استوانه‌ای با هسته فوم فلزی تابعی را مورد بررسی قرار داده و افزایش ۱۰ درصدی در بار بحرانی کمانش را گزارش دادند. همچنین در جدیدترین پژوهش‌ها، نتایج مطالعه تجربی کمانش موضعی سازه ساندویچی سبک مورد استفاده در هواپیما که در ابعاد بزرگ‌تر نسبت به آزمایش‌های قبلی انجام شده است، به چاپ رسیده است [۱۲].

نیروی بحرانی کمانش به ازای اندازه المان‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است (شکل ۵). با توجه به شکل (۵)، اندازه المان ۶ mm برای المان‌بندی و تحلیل مدل اجزای محدود در ادامه کار انتخاب شده است.

پس از اتمام مراحل مدل‌سازی اجزاء محدود و انجام تحلیل خطی کمانش، هشت مقدار ویژه پانل که همان هشت بار بحرانی کمانش مربوط به هشت شکل مود توسط نرم افزار محاسبه و تعیین گردید. بر این اساس، مقدار بار بحرانی کمانشی مود اول ۳۳۴ کیلو نیوتن به دست آمد. این مقدار در مقایسه با مقدار تجربی ۳۲۵ کیلو نیوتن [۱۳]، اختلاف نسبی ۲/۷ درصد دارد. اختلاف نسبی زیر ۳ درصد بین نتایج حل اجزای محدود و آزمایش، با دقت خوبی صحت مدل‌سازی و حل اجزای محدود کمانش پانل را نشان می‌دهد. مقدار بار بحرانی هشت مود کمانش پانل به همراه شکل مدهای آن در شکل (۶) نشان داده شده است.



شکل ۵ بررسی استقلال از شبکه نتایج مدل اجزای محدود

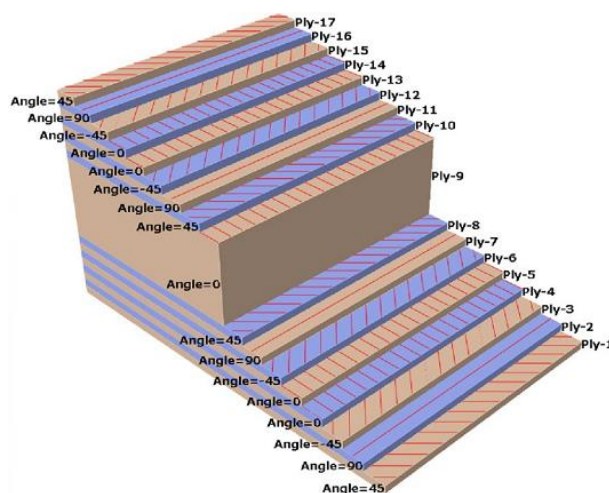


شکل ۶ هشت شکل مود و بار بحرانی کمانش پانل کامپوزیتی

هر رویه از ۸ لایه به ضخامت ۰/۱۳۷۵ mm و جهت‌گیری $[45^\circ/90^\circ/-45^\circ/0^\circ]_s$ تشکیل شده است (شکل ۴). ضخامت هسته نیز ۲۵/۴ mm در نظر گرفته شده است. جنس هسته و تک‌لایه‌ها به صورت الاستیک خطی و اورتوتروپیک تعریف شده است. ثوابت الاستیک هسته آلومینیومی و تک‌لایه کربن/اپوکسی T300/5208 در جدول‌های (۱) و (۲) ارائه شده است.

برای اعمال بارگذاری و شرایط مرزی، گره‌های لبه بالایی مدل اجزای محدود به نقطه مرجع تعریف شده در وسط لبه مقید^۱ شده است. در مورد گره‌های واقع بر لبه پایینی مدل نیز اقدام مشابهی انجام شده است. نهایتاً، نقطه مرجع لبه پایینی کاملاً مقید شده و به نقطه مرجع لبه بالایی نیز فقط اجازه جابجایی در راستای y داده شده است. همچنین، نیروی متمرکز واحدی در راستای منفی محور y به نقطه مرجع لبه بالایی اعمال شده است تا مدل را تحت فشار محوری قرار دهد.

برای المان‌بندی مدل، از المان‌های چهارضلعی خطی استفاده شده است. استقلال نتایج از اندازه المان‌ها، با استفاده از تعیین



شکل ۴ نمایش جهت‌گیری لایه‌ها در رویه‌ها نسبت به هسته [۱۳]

جدول ۱ ثوابت الاستیک هسته آلومینیومی لانه زنبوری [۱۴]

$E_1 = 0.1467 \text{ MPa}$	$G_{12} = 0.0366 \text{ MPa}$	$\nu_{12} = 0.33$
$E_2 = 0.1467 \text{ MPa}$	$G_{13} = 310.26 \text{ MPa}$	$\nu_{13} = 10^{-5}$
$E_3 = 517.10 \text{ MPa}$	$G_{23} = 151.68 \text{ MPa}$	$\nu_{23} = 10^{-5}$

جدول ۲ ثوابت الاستیک کربن/اپوکسی T300/5208 [۱۵]

$E_1 = 132379 \text{ MPa}$	$G_{12} = 5653.7 \text{ MPa}$	$\nu_{12} = 0.24$
$E_2 = 10755 \text{ MPa}$	$G_{13} = 5653.7 \text{ MPa}$	$\nu_{13} = 0.24$
$E_3 = 10755 \text{ MPa}$	$G_{23} = 3378.4 \text{ MPa}$	$\nu_{23} = 0.49$

^۱ Tie

۳- تاثیر عوامل مختلف بر بار بحرانی کمانش پانل

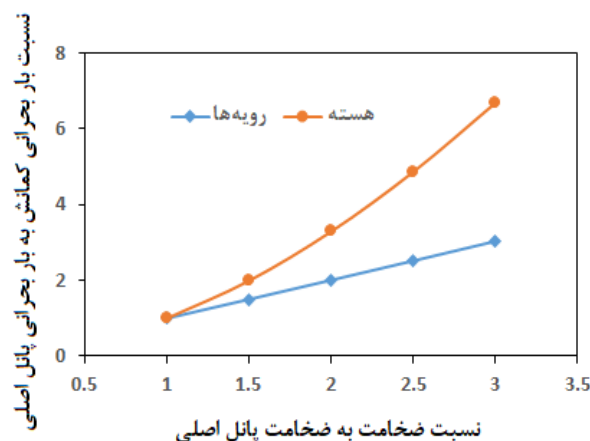
پس از مدلسازی اجزای محدود کمانش پانل ساندویچی کامپوزیتی و صحنه‌گذاری آن، تاثیر عوامل مختلف بر بار بحرانی کمانش پانل با استفاده از تحلیل اجزای محدود با روند مشابه، مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۳-۱- اثر ضخامت هسته و رویه‌ها

ضخامت یکی از پارامترهای مهم در مطالعه سازه‌های ساندویچ پانل است. در شکل (۷)، بار بحرانی کمانش برای پانل با افزایش جداگانه ضخامت هسته و رویه‌ها با نسبت ۱/۵، ۲، ۲/۵ و ۳ برابری نسبت به ضخامت پانل اصلی نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، نیروی بحرانی کمانش با افزایش نسبی ضخامت رویه‌ها به صورت خطی افزایش می‌یابد. ولی افزایش ضخامت نسبی هسته تاثیر غیرخطی و بیشتری بر افزایش بار بحرانی دارد. این رفتار با توجه به ضخامت بسیار کم رویه‌ها در مقایسه با ضخامت هسته در پانل اصلی توجیه پذیر است. به عبارت دیگر، تاثیر افزایش ضخامت رویه‌ها در افزایش سفتی خمشی پانل با توجه به ضخامت کم آن‌ها و نیز فاصله زیاد با صفحه خنثی به صورت خطی خواهد بود ولی در مورد هسته، این افزایش تقریباً از مرتبه سه می‌باشد.

۳-۲- اثر جنس و ساختار هسته

هسته ساندویچ پانل به دلیل قابلیت بالا بردن سفتی خمشی سازه در کنار افزایش بسیار اندک در وزن آن، فاصله دادن رویه‌ها و تحمل نیروی‌های برشی و فشاری، نقش بسیار اساسی در طراحی سازه ایفا می‌کند. بنابراین، در این قسمت با ثابت نگه داشتن



شکل ۷ تاثیر ضخامت هسته و رویه‌ها بر بار بحرانی کمانش

مشخصات رویه‌ها، پانل با دو ساختار لانه زنبوری و فوم در جنس‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. هسته‌های مورد بررسی شامل لانه زنبوری تیتانیومی، لانه زنبوری آرامیدی (نامکس)، فوم آلومینیومی، فوم تیتانیومی، فوم پلی وینیل کلراید (PVC) و فوم پلی متاکریلیمید می‌باشند. ثوابت الاستیک هسته اورتوتروپیک لانه زنبوری تیتانیومی در جدول (۳) و ثوابت الاستیک همسانگرد سایر هسته‌ها در جدول (۴) ارائه شده است. نیروی بحرانی کمانش پانل با هسته‌های مختلف در جدول (۵) ارائه شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، هسته آلومینیومی با ساختار فوم حدود ۱۳ درصد منجر به افزایش بار بحرانی کمانش نسبت به ساختار لانه زنبوری شده است. در ساختار لانه زنبوری نیز، تاثیر جنس توانسته است بار بحرانی را تا ۲۲ درصد در هسته نامکس نسبت به هسته آلومینیومی افزایش دهد. به طور مشابه، در ساختار فوم، تاثیر جنس توانسته است بار بحرانی بیشینه هسته تیتانیومی را تا ۲/۵ برابر مقدار کمینه مربوط به هسته پلی متاکریلیمید افزایش دهد. اثر جنس هسته بر بار بحرانی کمانش را می‌توان بیشتر به مدول الاستیسیته و سفتی ارتباط داد.

جدول ۳ ثوابت الاستیک هسته لانه زنبوری تیتانیومی [۱۶]

$E_1 = 191.52 \text{ MPa}$	$G_{12} = 4.22e-5 \text{ MPa}$	$\nu_{12} = 6.5e-3$
$E_2 = 191.52 \text{ MPa}$	$G_{13} = 565.14 \text{ MPa}$	$\nu_{13} = 6.4e-7$
$E_3 = 1915.2 \text{ MPa}$	$G_{23} = 1247.95 \text{ MPa}$	$\nu_{23} = 6.4e-7$

جدول ۴ ثوابت الاستیک هسته‌های همسانگرد [۱۷-۲۱]

هسته	$E \text{ (MPa)}$	ν	$G \text{ (MPa)}$
لانه زنبوری نامکس	1878	0.33	----
فوم آلومینیومی	1000	0.34	350
فوم تیتانیومی	9900	0.33	----
فوم پلی وینیل کلراید	200	0.4	70
فوم پلی متاکریلیمید	85	0.42	30

جدول ۵ نیروی بحرانی کمانش پانل با هسته‌های مختلف

هسته	$P_{cr} \text{ (kN)}$
لانه زنبوری آلومینیومی	۳۳۴
لانه زنبوری تیتانیومی	۳۶۴
لانه زنبوری نامکس	۴۱۱
فوم آلومینیومی	۳۷۷
فوم تیتانیومی	۶۵۴
فوم پلی وینیل کلراید	۳۱۲
فوم پلی متاکریلیمید	۲۶۱

۳-۳- اثر جنس رویه

۳-۳-۱- رویه هیبریدی کربن/اپوکسی و بازالت/اپوکسی

برای بررسی اثر رویه‌های هیبریدی، پانل با رویه‌های متشکل از لایه‌های کربن/اپوکسی و بازالت/اپوکسی (با خواص ارائه شده در جدول ۶) در ۱۴ حالت لایه‌بندی و همان جهت‌گیری $[45^\circ/90^\circ/-45^\circ/0^\circ]_s$ مدلسازی و حل شد. بر اساس نتایج به دست آمده (جدول ۷)، در لایه‌بندی‌هایی که کربن/اپوکسی در لایه دوم و با زاویه ۹۰ درجه و بازالت/اپوکسی در لایه چهارم و با زاویه صفر درجه نسبت به محور x قرار دارند (حالت ۲، ۶، ۹ و ۱۲)، افزایش نیروی بحرانی کمانش مشاهده شده است. لایه‌بندی حالت ۹ با داشتن حداقل یک لایه کامپوزیت کربن/اپوکسی بیشتر نسبت به حالت‌های ۲، ۶ و ۱۲، بیشترین نیروی بحرانی کمانش را نتیجه داده است.

۳-۳-۲- رویه هیبریدی آلایژ تیتانیوم Ti-6Al-4V

کربن/اپوکسی و آرامید/اپوکسی

در نوعی از کامپوزیت‌های هیبریدی، کامپوزیت‌های پایه پلیمری با ورق آلایژ فلزاتی مانند آلومینیوم، تیتانیوم، فولاد و منیزیم ترکیب می‌شوند. عملاً در این نوع از کامپوزیت‌های هیبریدی، از خواص برتر هر یک از مواد برای دستیابی به مجموعه خواص مطلوب نظیر استحکام بالا، نسبت سفتی به وزن بالا، عمر خستگی بالا، نیروی بحرانی کمانش بیشتر، مقاومت خوردگی

جدول ۶ ثوابت الاستیک کامپوزیت‌ها و آلایژهای مورد استفاده در رویه‌های هیبریدی، اعداد بر حسب MPa هستند [۲۵-۲۲]

	$E_1 = 45.8$	$G_{12} = 11.3$	$\nu_{12} = 0.04$
بازالت/اپوکسی	$E_2 = 45.8$	$G_{13} = 2.70$	$\nu_{13} = 0.3$
	$E_3 = 7.10$	$G_{23} = 2.70$	$\nu_{23} = 0.305$
	$E_1 = 83.0$	$G_{12} = 2.1$	$\nu_{12} = 0.41$
آرامید/اپوکسی	$E_2 = 7.0$	$G_{13} = 2.1$	$\nu_{13} = 0.4$
	$E_3 = 7.0$	$G_{23} = 1.86$	$\nu_{23} = 0.41$
	$E_1 = 14.3$	$G_{12} = 5.55$	$\nu_{12} = 0.31$
بور/اپوکسی	$E_2 = 10.5$	$G_{13} = 5.55$	$\nu_{13} = 0.022$
	$E_3 = 10.5$	$G_{23} = 5.55$	$\nu_{23} = 0.31$
	$E_1 = 55.5$	$G_{12} = 4.55$	$\nu_{12} = 0.32$
شیشه S2/اپوکسی	$E_2 = 7.5$	$G_{13} = 4.55$	$\nu_{13} = 0.067$
	$E_3 = 7.5$	$G_{23} = 4.55$	$\nu_{23} = 0.32$
Ti-6Al-4V	$E = 118.6$	$G = 45.62$	$\nu = 0.33$
Al 2024-T3	$E = 72.4$	$G = 27.6$	$\nu = 0.33$

جدول ۷ بار بحرانی کمانش پانل کامپوزیتی برای حالت‌های مختلف لایه‌بندی رویه‌های هیبریدی کربن/اپوکسی و بازالت/اپوکسی

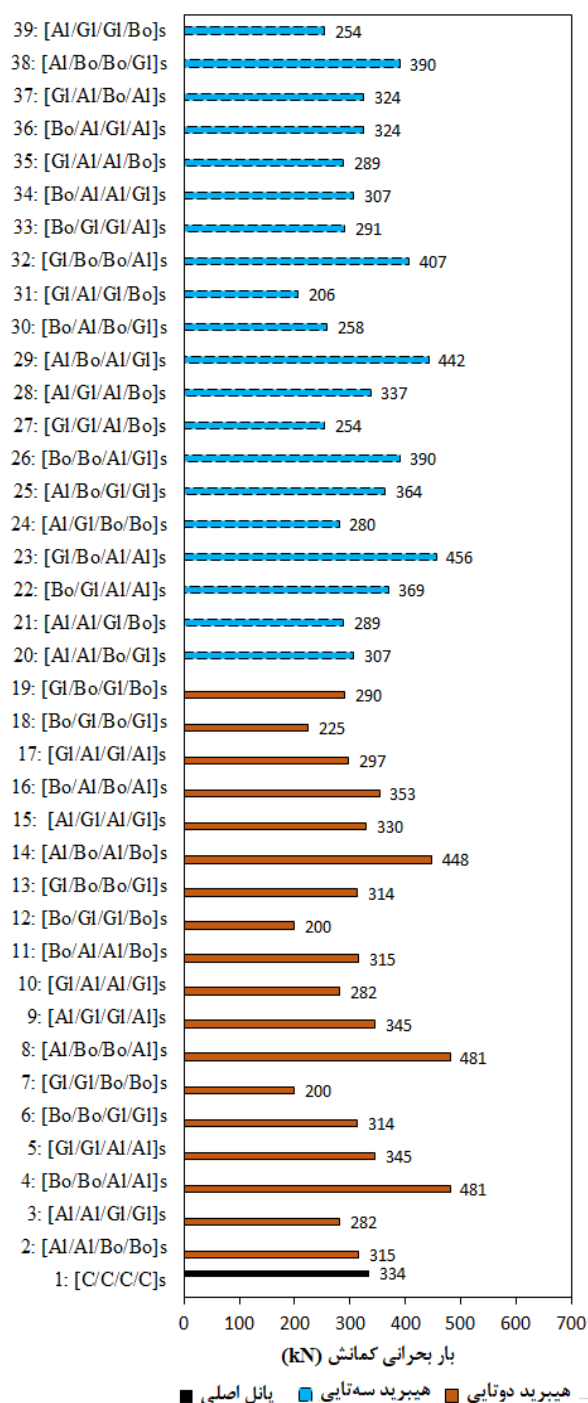
حالت	لایه‌بندی	P_{cr} (kN)
۱	$[C/C/C/C]_s$	۳۳۴
۲	$[C/C/B/B]_s$	۳۶۴
۳	$[B/B/C/C]_s$	۲۰۰
۴	$[C/B/C/B]_s$	۲۶۳
۵	$[B/C/B/C]_s$	۳۱۷
۶	$[B/C/C/B]_s$	۳۶۴
۷	$[C/B/B/C]_s$	۲۰۰
۸	$[B/B/B/C]_s$	۱۹۹
۹	$[C/C/C/B]_s$	۳۷۶
۱۰	$[C/C/B/C]_s$	۳۲۰
۱۱	$[B/B/C/B]_s$	۲۵۰
۱۲	$[B/C/B/B]_s$	۳۶۲
۱۳	$[C/B/C/C]_s$	۲۱۶
۱۴	$[B/B/B/B]_s$	۲۴۸

بالا و افزایش شکل پذیری استفاده می‌شود. برای بررسی تاثیر استفاده از این نوع رویه‌های هیبریدی، با ثابت ماندن همه ویژگی‌های رویه‌ها، لایه‌بندی‌های مختلف مدلسازی و پانل تحلیل کمانش شده است. بار بحرانی کمانش به دست آمده برای حالت‌های مختلف لایه‌بندی در شکل (۷) ارائه شده است.

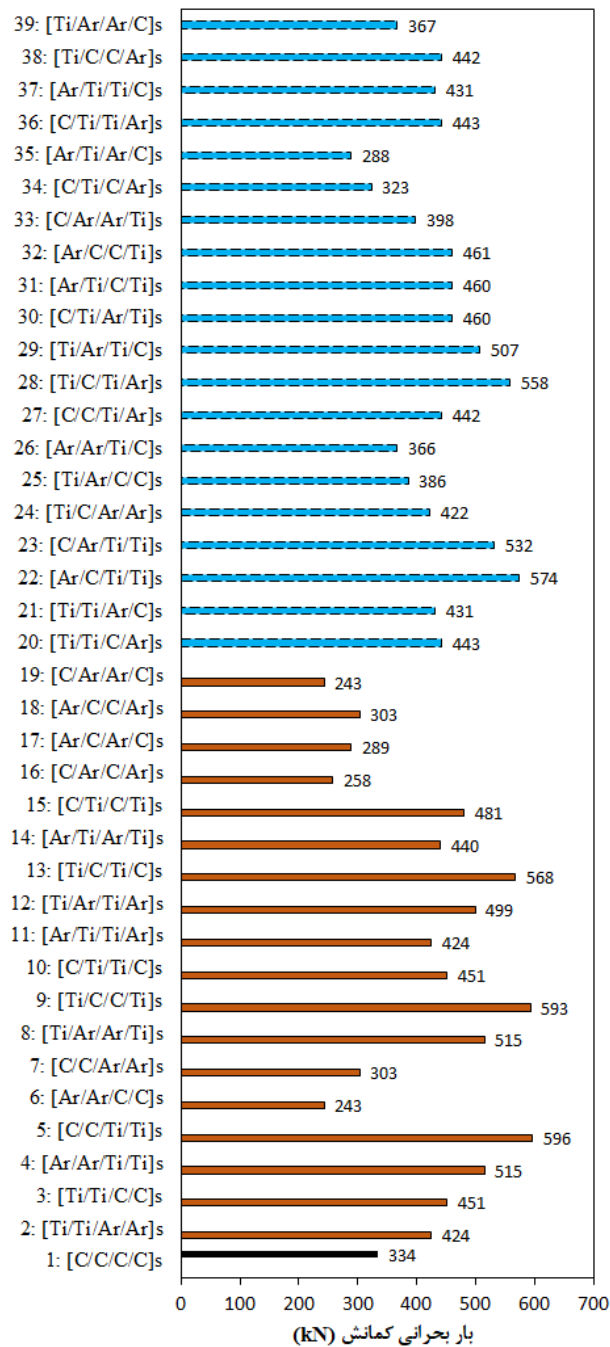
با توجه به نتایج به دست آمده، بار بحرانی کمانش لایه‌بندی حالت ۳ بیشتر از حالت ۲ است (شماره حالت‌ها روی محور عمودی شکل (۸) مشخص شده است). در رویه‌های لایه‌بندی ۲ و ۳، لایه‌های بیرونی از ورق‌های تیتانیومی و لایه‌های درونی به ترتیب از کامپوزیت‌های کربن/اپوکسی و آرامید/اپوکسی تشکیل شده است. در این لایه‌بندی‌ها، کامپوزیت‌های آرامید و کربن با زوایای ۴۵- و صفر درجه قرار گرفته‌اند. همسانگرد بودن آلایژ تیتانیوم و مستقل بودن خواص مکانیکی آن از جهت منجر به عدم تاثیر جهت‌گیری ورق‌های تیتانیومی موجود در رویه‌ها بر بار بحرانی کمانش می‌شود. بنابراین، با توجه به بیشتر بودن مدول الاستیک راستای x کربن/اپوکسی از آرامید/اپوکسی، بیشتر بودن بار بحرانی کمانش لایه‌بندی حالت ۳ از حالت ۱ کاملاً منطقی می‌نماید. سایر افزایش و کاهش‌های بار بحرانی کمانش که در شکل (۸) نشان داده شده است نیز به طریق مشابه قابل استدلال است.

بر اساس مقادیر شکل (۸)، در رویه‌های هیبریدی متشکل از دو و سه ماده، بیشترین بار بحرانی کمانش به ترتیب ۵۹۶ و ۵۷۴

بر رویه‌های هیبریدی بخش ۳-۳-۲، پانل با رویه‌های متشکل از لایه‌بندی‌های مختلف آلیاژ آلومینیوم Al 2024، کامپوزیت الیافی بور/اپوکسی و کامپوزیت الیافی شیشه S₂/اپوکسی تحلیل کمانش شده است. نتایج این تحلیل در شکل (۹) ارائه شده است. بر اساس نتایج به دست آمده (شکل ۹)، به طور کلی استفاده از رویه‌های هیبریدی آلیاژ آلومینیوم و کامپوزیت بور/اپوکسی باعث افزایش بار بحرانی می‌شود که بیشترین مقدار آن مربوط به لایه‌بندی‌های ۴ و ۸ و برابر با ۴۸۱ کیلونیوتن می‌باشد. از مقایسه



شکل (۹) مقایسه بار بحرانی کمانش برای لایه‌بندی‌های مختلف

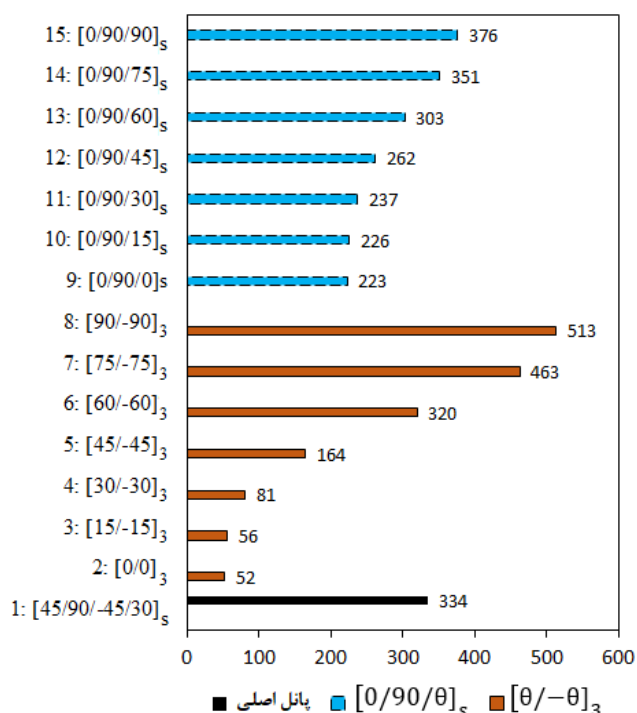


شکل ۸ مقایسه بار بحرانی کمانش برای لایه‌بندی‌های مختلف رویه‌های دوتایی و سه‌تایی تیتانیوم، کربن/اپوکسی و آرامید/اپوکسی

کیلونیوتن و مربوط به لایه‌بندی‌های حالت ۵ و ۲۲ است. بنابراین با استفاده از لایه‌بندی هیبریدی از مواد مورد بررسی می‌توان بار بحرانی کمانش پانل را تا ۷۸ درصد افزایش داد.

۳-۳-۳- رویه هیبریدی آلیاژ آلومینیوم Al 2024-T3، بور/اپوکسی و شیشه S₂/اپوکسی

برای جامعیت بخشی به مطالعه تاثیر رویه‌های هیبریدی، علاوه



شکل ۱۰ مقایسه بار بحرانی کمناش برای پانل با چیدمان مختلف رویه‌ها

افزایش می‌یابد (شکل ۱۰). این افزایش به خصوص در بازه $\theta = 30$ تا $\theta = 90$ قابل ملاحظه است. بیشینه افزایش بار بحرانی کمناش نسبت به پانل اصلی در $\theta = 90$ ، $34/7\%$ درصد گزارش شده است. این مشاهده با توجه به این که در این چیدمان، الیاف در همه لایه‌ها در راستای اعمال بار فشاری قرار دارند و بیشترین مدول الاستیسیته کامپوزیت‌ها در راستای الیاف است توجیه می‌شود.

در چیدمان $[0/90/\theta]_s$ ، بار بحرانی کمناش در بازه $\theta = 0$ تا $\theta = 60$ کمتر از پانل اصلی بوده و فقط به ازای $\theta = 75$ و $\theta = 90$ بار بحرانی به ترتیب $4/7\%$ و 11% درصد افزایش را نشان می‌دهد (شکل ۱۰). به طور کلی با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان نتیجه گرفت که برای چیدمان‌های مورد بررسی، با افزایش θ بار بحرانی کمناش افزایش یافته و بیشینه مقدار در $\theta = 90$ اتفاق می‌افتد. همچنین، در بین چیدمان‌های مورد مطالعه، چیدمان $[90/-90]_3$ بیشترین بار بحرانی کمناش (513 kN) را دارد.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، با استفاده از روش اجزا محدود، مقدار ویژه مود کمناشی و بار بحرانی کمناش برای یک پوسته با ساختار ساندویچ پانل کامپوزیتی مورد محاسبه قرار گرفت. این محاسبه برای

رویه‌های دوتایی و سه‌تایی آلومینیوم، بور/اپوکسی و شیشه/اپوکسی لایه‌بندی ۴ و ۵ می‌توان نتیجه گرفت که وجود کامپوزیت بور/اپوکسی در لایه‌بندی ۴ که در جهت 90° درجه دارای مدول الاستیسیته و سفتی برشی بیشتری نسبت به کامپوزیت شیشه/اپوکسی است، 136 kN نیروی بحرانی بیشتری نسبت به لایه‌بندی ۵ دارد.

همچنین، با تغییر لایه میانی از بور/اپوکسی به شیشه/اپوکسی در لایه‌بندی ۹ نسبت به لایه‌بندی ۸، کاهش نیروی بحرانی قابل ملاحظه است. این کاهش را می‌توان ناشی از بیشتر بودن زیاد سفتی برشی و مدول برشی کامپوزیت بور/اپوکسی نسبت به کامپوزیت شیشه/اپوکسی در راستای اعمال بار دانست. در رویه‌های هیبریدی با لایه‌بندی یک در میان ورق‌های کامپوزیتی و آلومینیومی، بیشترین بار بحرانی در لایه‌بندی ۱۴ مشاهده شده است. در این حالت، جایگزینی ورق‌های کامپوزیتی (لایه‌بندی ۱۵) منجر به کاهش زیاد بار بحرانی کمناش شده است که به دلیل کمتر بودن مدول الاستیسیته کامپوزیت شیشه/اپوکسی در راستای عرضی است.

در رویه‌های هیبریدی متشکل از دو و سه ماده مورد نظر در این بخش، بیشترین بار بحرانی کمناش به ترتیب 481 و 456 کیلونیوتن و مربوط به لایه‌بندی‌های حالت ۴ یا ۸ و ۲۳ است. کمینه بار بحرانی در کل رویه‌ها نیز در لایه‌بندی‌های ۷ و ۱۲ برابر با 200 کیلونیوتن است. بنابراین با استفاده از لایه‌بندی هیبریدی این بخش، بار بحرانی کمناش پانل به ترتیب دچار افزایش و کاهش 44% و 56% درصدی می‌شود.

۴-۳- تاثیر چیدمان رویه

در این مطالعه، رویه پانل متشکل از صفحات کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف کربن در نظر گرفته شده است. همان طور که در پیشینه تحقیق اشاره شد، یکی از عوامل مهم و اثرگذار بر استحکام ساندویچ پانل‌های کامپوزیتی، چیدمان لایه‌های رویه‌های آن است. لذا در این بخش، ضمن ثابت نگه داشتن جنس هسته و ابعاد پانل، با تغییر چیدمان لایه‌ها بار بحرانی کمناش تعیین شده است. با لحاظ نمودن قابلیت ساخت رویه‌ها و با توجه به چیدمان‌های مرسوم برای ورق‌های کامپوزیتی، چیدمان‌های $[0/90/\theta]_s$ و $[\theta/-\theta]_3$ به ازای $\theta = 0, 15, 30, 45, 60, 75, 90$ در نظر گرفته شده‌اند. بار بحرانی کمناش برای چیدمان‌های مختلف رویه‌ها در شکل (۱۰) ارائه شده است.

در چیدمان $[\theta/-\theta]_3$ ، با افزایش θ بار بحرانی کمناش پانل

and failure of sandwich plates with graphite-epoxy faces and various cores, *J Aircraft*, Vol. 25, No. 4, pp. 372-379, (1987).

[3] Kim, H. J., Hong, C. S., Buckling and post buckling behavior of composite laminates with a delamination, *J Composites Science and Technology*, Vol. 57, No. 5, pp. 557-564, (1997).

[4] Hause, T., Johnson, T. E., Librescu, L., Effect of face-sheet anisotropy on buckling and postbuckling of sandwich plates, *J Spacecraft and Rockets*, Vol. 37, No. 3, pp. 331-341, (2000).

[5] Komur, M. A., Sen, F., Atas, A., Arslan, N., Buckling analysis of laminated composite plates with an elliptical/circular cutout using FEM, *J Advances in Engineering Software*, Vol. 41, No. 2, pp. 161-164, (2010).

[6] Dhuban, S. B., Karuppanan, S., Mengal, A. N., Patil, S. S., Effect of fiber orientation and ply stacking sequence on buckling behavior of basalt-carbon hybrid composite laminates, *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*, Vol. 23, pp. 187-193, (2017).

[7] Shahverdi, H., Barati, M. R., Hakimelahi, B., Post-buckling analysis of honeycomb core sandwich panels with geometrical imperfection and graphene reinforced nano-composite face sheets, *Materials Research Express*, Vol. 6, pp. 1-15, (2019).

[8] Zhai, Y., Ma, J., Yan, Y., Li, Q., Wang, Sh., Wang, G., Thermal buckling and free vibration of composite sandwich curved panels, *Composite Structures*, Vol. 267, doi. 10.1016/j.compstruct.2021.113869, (2021).

[9] Oiwa, M., Ogasawara, T., Yoshinaga, H., Oguri, T., Aoki, T., Numerical analysis of face sheet buckling for a CFRP/Nomex honeycomb sandwich panel subjected to bending loading, *Composite Structures*, Vol. 270, doi. 10.1016/j.compstruct.2021.114037, (2021).

[10] Andrade, P., Lagerqvist, O., Simoes, R., Sas, G., On global and local buckling response of structural angle sandwich panels, *Thin-Walled Structures*, Vol. 180, doi. 10.1016/j.tws.2022.109835, (2022).

[11] Keleshteri, M. M., Jelovica, J., Analytical solution for vibration and buckling of cylindrical sandwich panels with improved FG metal foam core, *Engineering Structures*, Vol. 266, doi. 10.1016/j.engstruct.2022.114580, (2022).

[12] Ginot, M., Bouvet, C., Castanie, B., Serra, J., Mahuet, N., Local buckling on large sandwich panels used in light aviation: Experimental setup and failure scenarios, *Composite Structures*, Vol. 304, doi. 10.1016/j.compstruct.2022.116439, (2023).

بررسی تاثیر عوامل مختلف مانند ضخامت رویه و هسته، جنس هسته، رویه‌های هیبریدی و چیدمان رویه‌ها انجام شد. با توجه به نتایج به دست آمده، موارد زیر قابل نتیجه‌گیری است:

- افزایش ضخامت در هسته و رویه سبب افزایش نیروی بحرانی می‌شود. با توجه به این که افزایش ضخامت رویه‌ها منجر به افزایش کسر حجمی الیاف و افزایش سفتی خمشی نیز می‌شود، لذا افزایش نیروی بحرانی پانل با استفاده از افزایش ضخامت رویه مناسب‌تر از افزایش ضخامت هسته است.

- هسته‌های لانه زنبوری به دلیل توزیع منظم فضای‌های خالی در هسته، توزیع تنش یکنواخت‌تری نسبت به هسته‌های فوم دارند. هسته لانه زنبوری نامکس بار بحرانی بیشتری را نسبت به هسته لانه زنبوری تیتانیومی نتیجه می‌دهد. فوم‌های فلزی به دلیل چگالی و مدول الاستیسیته بیشتر نسبت به فوم‌های پلیمری، منجر به افزایش بار بحرانی می‌شوند.

- بیشتر بودن مدول الاستیسیته و مدول برشی ورق‌های تیتانیومی نسبت به آلومینیومی، سبب افزایش ظرفیت تحمل نیروی فشاری و سفتی خمشی می‌شود. ترکیب کامپوزیت کربن/اپوکسی با ورق تیتانیومی و کامپوزیت آرامید/اپوکسی که چگالی کمتری نسبت به شیشه و بور دارد، می‌تواند سبب ایجاد پانل با چگالی کم و حداکثر نیروی بحرانی کمانش نسبت به سایر رویه‌های هیبریدی شود.

- در ساخت پانل‌های کامپوزیتی با رویه‌های ۶ لایه، حداکثر نیروی بحرانی کمانش از چیدمان $[\theta/-\theta]_3$ با زاویه $\theta = 90$ نتیجه می‌شود. در این حالت الیاف همه لایه‌ها در راستای اعمال نیروی فشاری قرار گرفته و استحکام کمانشی بیشینه می‌شود. بدیهی است که برای انتخاب چیدمان مناسب لایه‌ها بایستی علاوه بر کمانش، سایر مودهای واماندگی نیز لحاظ شود.

- بدیهی است که هزینه ساخت بایستی به عنوان یک عامل مهم در ارزیابی نهایی انتخاب مشخصات پانل لحاظ شود. هر چند مقایسه اقتصادی شرایط مختلف از موزه این مطالعه خارج بوده است ولی می‌توان گفت: اهمیت بالای جلوگیری از کمانش در پروژه‌های فضایی، هزینه ساخت بیشتر احتمالی برای پانل با بار بحرانی کمانش بیشتر را توجیه می‌نماید.

۵- مراجع

[1] Lee, J. R., Dhital, D., Review of flaws and damages in space launch vehicle: structures, *Int J Material Systems and Structures*, Vol. 24, No. 1, pp. 4-20, (2012).

[2] Minguet, P., Dugundji, J., Lagace, P. A., Buckling

- of the nonuniform thermal expansion coefficient of a PVC foam core by speckle interferometry-influence on the mechanical behavior of sandwich structures, *Journal Of Cellular Plastics*, Vol. 42, pp. 392-404, (2006).
- [20] Ashby, M. F., Evans, A. G., Fleck, N. A., Gibson, L. J., Hutchinson, J. W., Wadley H. N. G., Metal foams: a design guide, *Butterworth-Heinemann*, (2000).
- [21] Mandourah, T. S., Fracture toughness of titanium foam using finite element crushable foam model, *American Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 6, No. 3, pp. 127-131, (2018).
- [22] Garcia, V., Vargas, L., Acuna, A., Sosa, J. B., Durazo, E., Ballesteros, R., and Ocampo, J., Evaluation of basalt fibers on wind turbine blades through finite element analysis, *Hindawi Advances in Materials Science and Engineering*, doi. 10.1155/2019/1536925, (2019).
- [23] Chang, P. Y., Yeh, P. C., Yang, J. M., Fatigue crack initiation in hybrid Boron/Glass/Aluminum fiber metal laminates, *Materials Science and Engineering*, Vol. 496, pp. 273-280, (2008).
- [24] AbdelGhany, A. W., Taha, I., Ebeid, S. J., Failure prediction of fiber reinforced polymer pipes using FEA, *International Journal of Engineering and Technical Research*, Vol. 4, No. 2, pp. 115-120, (2016).
- [25] Miller, J. L., Progar, D. J., Johnson, W. S., Clair, T. L. St., Preliminary evaluation of hybrid titanium composite laminates, *The Journal of Adhesion*, Vol. 54, pp. 1-32, (1995).
- [13] Kosareo, D. N., Oliver, S. T., Bednarczyk, B. A., Pineda, E. V., Buckling design and analysis of a payload fairing 1/6th cylindrical arc-segment panel, 55th *AIAA/ASME/ASCE/AHS/SC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, Maryland, USA, (2014).
- [14] Pineda, E. J., Myers, D. E., Kosareo, D. N., Zalewski, B. F., Kellas, S., Dixon, G. D., Krivanek, T. M., and Gyekenyesi, T. G., Buckling testing and analysis of honeycomb sandwich panel arc segments of a full-scale fairing barrel: comparison of in-and out-of-autoclave facesheet configurations, 55th *AIAA/ASME/ASCE/AHS/SC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, Maryland, USA, (2014).
- [15] Cagdas, I. U., Adali, S., Effect of fiber orientation on buckling and first-ply failures of cylindrical shear-deformable laminates, *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 139, No. 8, pp. 968-978, (2013).
- [16] William, L. K., Raymond, H. J., Thermal behavior of a titanium honeycomb core sandwich panel, *Nasa Technical Memorandum 101732*, pp. 1-12, (1991).
- [17] Giglio, M., Gilioli, A., Manes, A., Numerical investigation of a three point bending test on sandwich panels with aluminum skins and nomexTM honeycomb core, *Computational Materials Science*, Vol. 56, pp. 69-78, (2012).
- [18] Rizov, V., Shipsha, A., Zenkert, D., Indentation study of foam core sandwich composite panels, *Composite Structures*, Vol. 69, pp. 95-102, (2005).
- [19] Ferreira, C., Jacquemin, F., Casari, P., Measurement

مروری بر روند توسعه سیستم های تولید همزمان برق، حرارت و برودت در ایران و جهان

چکیده: افزایش روز افزون سطح رفاه زندگی در جوامع بشری به ویژه در شهرهای بزرگ سبب ازدیاد مصرف انرژی به خصوص انرژی الکتریکی شده است. یکی از مصارف عمده انرژی الکتریکی در داخل کشور در حوزه سرمایش بوده که در سالیان اخیر سهم قابل توجهی از بار پیک شبکه را به خود اختصاص داده است. یکی از راه کارهایی که امروزه سیاست گذاران انرژی در دنیا از آن به عنوان ابزاری مؤثر و کارآمد در مدیریت انرژی بهره می برند، تولید انرژی بر مبنای روش تولید همزمان برق، حرارت و برودت (یا به اختصار تولید همزمان) است. تولید همزمان تولید توأم دو یا چند شکل از انرژی (مانند انرژی الکتریکی، حرارتی و برودتی) از یک منبع ساده اولیه (مانند انرژی شیمیایی سوخت های مختلف) می باشد. هدف اصلی این مطالعه، بررسی سیستم های CCHP موجود در ایران و جهان است که مشتمل بر انواع محرک های اولیه استفاده شده و شرکت های خارجی و داخلی فعال در این زمینه می باشد.

واژه های راهنما: سیستم تولید همزمان، موتور گازسوز، چیلر جذبی، بومی سازی، توسعه فناوری

مرتضی حسین پور

استادیار، گروه پژوهشی انرژی های
تجدید پذیر، پژوهشگاه نیرو، تهران

جاماسب پیرکندی*

دانشیار، مجتمع دانشگاهی هوافضا،
دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

شبنام منصوری

پژوهشگر ارشد، پژوهشگاه نیرو، تهران

مصطفی نوری

پژوهشگر ارشد، شرکت مدیریت
تولید، انتقال و توزیع برق (توانیر)،
تهران

مقاله مروری

دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۲۳

پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۱۷

**Morteza
Hosseinpour**
Assistant Professor,
Renewable Energy
Research Group, Niroo
Research institute
(NRI), Tehran

Jamasb Pirkandi*
Associate Professor,
Faculty of Aerospace,
Malek Ashtar University
of Technology, Tehran

**Shabnam
Mansoori**
Senior Researcher,
Niroo Research institute
(NRI), Tehran

Mostafa Noori
Senior Researcher,
TAVANIR, Tehran

An overview of the development process of combined cooling, heating, and power (CCHP) systems in Iran and the world

Abstract: Increasing welfare level in human societies, especially in big cities, has caused an increase in energy consumption, especially electric energy. One of the major uses of electrical energy in our country is in the field of cooling, which has taken a significant share of the network's peak load in recent years. One of the solutions that today's energy policymakers in the world use as an effective and efficient tool in energy management is energy production based on the method of simultaneous production of electricity, heat and cooling (or in short, simultaneous production). Simultaneous production is the combined production of two or more forms of energy (such as electrical, thermal and refrigeration energy) from a simple primary source (such as chemical energy of different fuels). The main purpose of this study is to examine the existing CCHP systems in Iran and the world, which includes the types of primary drivers used and foreign and domestic companies active in this field.

Keywords: CCHP, Gas Engine, Absorption Chiller, Localization, Technology Development

۱- مقدمه

انرژی نقش ویژه‌ای در رشد اقتصادی، رفاه اجتماعی، بهبود کیفیت زندگی و امنیت یک جامعه ایفا می‌کند. پژوهش‌های جهانی نشان می‌دهند میان توسعه یک کشور و میزان انرژی مصرفی آن، رابطه مستقیمی برقرار است و از این رو دسترسی کشورهای در حال توسعه به انواع منابع جدید انرژی، به منظور پیشرفت و بهبود وضع اقتصادی آنها اهمیت ویژه‌ای دارد. در این میان انرژی الکتریکی از عوامل اصلی و زیربنایی رشد و شکوفایی بخش‌های صنعتی، اقتصادی و اجتماعی است به طوری که می‌توان گفت یکی از شاخص‌های ارزیابی و پیشرفت کشورها، شاخص افزایش ظرفیت تولید و توزیع انرژی الکتریکی است. در سال‌های اخیر نوعی آگاهی و توجه به افزایش بی‌رویه مصرف انرژی و نیز واقعیت فناپذیر بودن سوخت‌های فسیلی سبب شده است که مطالعات همه جانبه‌ای در سطح جهانی با هدف کاهش میزان مصرف انرژی و نیز کاهش هزینه‌های تولید انرژی، بدون ایجاد لطمه به روند توسعه‌ی کشورها، انجام پذیرد. این مطالعات باعث به وجود آمدن برنامه‌ها و استراتژی‌هایی موسوم به مدیریت انرژی گردیده است.

یکی از راه‌کارهایی که امروزه سیاست‌گذاران انرژی در دنیا از آن به عنوان ابزاری مؤثر و کارآمد در مدیریت انرژی بهره می‌برند، تولید انرژی بر مبنای روش تولید همزمان برق، حرارت و برودت است. تولید همزمان که نوعی خاص از روش تولید پراکنده است، عبارتست از تولید توأم دو یا چند شکل از انرژی (مانند انرژی الکتریکی، حرارتی و برودتی) از یک منبع ساده اولیه (مانند انرژی شیمیایی سوخت‌های مختلف)، از آنجایی که در الگوی تولید همزمان، انرژی‌های اولیه مصرفی یعنی برق، حرارت و برودت از طریق یک سیستم با سوخت ورودی معین تأمین می‌گردند، در نتیجه هزینه‌های تأمین انرژی به طرز قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. در روش‌های رایج، مصرف‌کننده مجبور است برق مورد نیاز خود را از شبکه‌ی سراسری خریداری نموده و از سوی دیگر برای مصارف گرمایشی و سرمایشی خود نیز هزینه‌های جداگانه‌ای را متحمل شود. در حالی که در شیوه تولید همزمان که در قالب تولید پراکنده از آن استفاده می‌شود، مصرف‌کننده از شبکه سراسری برق، مستقل شده و از سوی دیگر چون از محتوای انرژی سوخت ورودی نهایت بهره را می‌برد (تا ۹۰٪)، میزان و هزینه‌ی انرژی‌های مصرفی به شدت کاهش می‌یابد [۱-۳].

سیستم‌های CHP^۱ و CCHP^۲ غالباً برای تولید همزمان چند نمونه مختلف از انرژی‌های الکتریکی، حرارتی و برودتی استفاده می‌شوند. این سیستم‌ها از چهار بخش اصلی محرک اولیه، مولد (ژنراتور)، مبدل حرارتی و سیستم کنترل تشکیل شده‌اند. کلیه این سیستم‌ها دارای یک محرک اولیه می‌باشند که انرژی شیمیایی سوخت را آزاد نموده و آن را به توان مکانیکی در محور خروجی تبدیل می‌کند. در این سیستم‌ها محور محرک با یک ژنراتور الکتریکی کوپل بوده و توان الکتریکی مشخصی در آن تولید می‌شود. بررسی‌ها نشان می‌دهد که حداکثر راندمان موجود برای محرک‌های اولیه و مولد-ها، کمتر از ۵۰ درصد بوده و این به این معنی است که بیش از نیمی از انرژی سوخت به صورت حرارت تلف می‌شود. در این سیستم‌ها انرژی حرارتی گازهای خروجی از محرک اولیه، سیال جاری در سیکل خنک‌کاری محرک و روغن روان‌کننده محرک اولیه، منابع اصلی اتلافات حرارتی بوده و می‌توان با قراردادن مبدل‌های حرارتی گرمای اتلافی را به شکل حرارت با دمای بالا و قابل استفاده بازیافت نمود. با فراهم شدن امکان استحصال حرارت اتلافی در سیستم‌های تولید همزمان، راندمان آنها بالا خواهد رفت و این یک خصوصیت بارز در این نوع سیستم‌ها می‌باشد. سیستم‌های تولید همزمان دارای راندمان بالایی (بیش از ۵۰ درصد) بوده و حدود ۳۰ تا ۳۵ درصد سوخت کمتری نسبت به سایر سیستم‌های موجود و سنتی مصرف می‌کنند. از دید ملی این صرفه‌جویی در مصرف سوخت می‌تواند چه از طریق صادرات و چه از طریق فراهم آمدن شرایطی برای استفاده‌های سودمندتر از سوخت فسیلی، مزیت محسوب شود. علاوه بر موارد فوق استفاده هرچه کمتر از سوخت‌های فسیلی باعث کاهش آلاینده‌های زیست محیطی نیز خواهد شد. از سوی دیگر این سیستم‌ها از اتلاف ۱۰ الی ۱۵ درصدی انرژی در شبکه انتقال برق جلوگیری می‌کند. توسعه ضریب پدافند غیر عامل (عدم وابستگی به انرژی الکتریکی شبکه) از دیگر مزایای سیستم‌های تولید همزمان می‌باشد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که ۴۵ تا ۶۵ درصد انرژی کل ورودی به سیستم به صورت انرژی حرارتی قابل بازیافت بوده و می‌توان از آن جهت تولید حرارت و برودت استفاده کرد. استفاده از سیستم‌های تولید همزمان به دلیل کاهش تلفات حرارتی، به شدت تلفات انرژی و بازگشت ناپذیری‌های سیستم را کاهش می‌دهد. این مزیت مهم باعث شده است که در سال‌های اخیر استفاده از این نوع

¹ Combined Cooling, Heat and Power² Combined Heat and Power

حالیست که هدف محرک دوم تولید بار سرمایشی و برودتی می‌باشد [۸-۱۱].

۲- انواع سیستم‌های CCHP

سیستم‌های CCHP بر اساس ظرفیت کاری، نوع عملکرد، محرک‌های اولیه و محرک‌های ثانویه طبقه‌بندی می‌شوند.

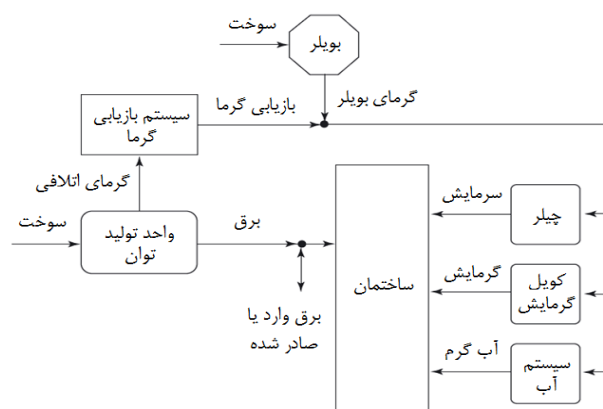
- طبقه بندی بر اساس ظرفیت

اندازه سیستم CCHP برحسب توان الکتریکی تولیدی آن بیان می‌شود. دانستن نیاز واقعی واحد مصرف‌کننده به انرژی الکتریکی، میزان بار گرمایشی و میزان بار سرمایشی در انتخاب درست ظرفیت یک سیستم CCHP و نحوه استفاده از آن تأثیر فراوانی دارد. از نقطه نظر اندازه‌های اسمی، سیستم‌های CCHP به انواع با مقیاس میکرو، کوچک، متوسط و بزرگ تقسیم‌بندی می‌شوند. محدوده ظرفیت میکروسیستم‌ها زیر ۲۰ کیلووات می‌باشد. هرچند میکروسیستم‌ها پتانسیل زیادی برای کاربردهای تجاری، اداری و مسکونی را دارند، اما نمونه‌های محدودی از آنها در حال حاضر و در بازار فعلی موجود است. محرک اولیه این نوع سیستم‌ها اغلب از نوع موتورهای رفت و برگشتی، پیل‌های سوختی و موتورهای استرلینگ می‌باشد. ظرفیت سیستم‌های مقیاس کوچک در محدوده ۲۰ کیلووات تا ۱ مگاوات بوده و در کاربردهای زیادی از قبیل فروشگاه‌ها، سوپرمارکت‌ها، بیمارستان‌ها، ادارات و صنایع کوچک مورد استفاده قرار می‌گیرند. این نوع سیستم‌ها نسبت به سایر سیستم‌های CCHP کاربرد بیشتری داشته و میکروتوربین‌ها و موتورهای رفت و برگشتی محرک اصلی آن‌ها می‌باشند. سیستم‌های مقیاس متوسط با ظرفیتی در محدوده ۱ مگاوات تا ۱۰ مگاوات، در کارخانه‌ها، کارگاه‌های صنعتی، ساختمان‌های مسکونی، اداری و تجاری بزرگ مورد استفاده قرار می‌گیرد. سیستم‌های مقیاس بزرگ نیز با ظرفیت بالای ۱۰ مگاوات یک منبع ایده‌آل تأمین انرژی برای کارخانجات و کارگاه‌های بزرگ، شهرک‌ها و همچنین مجموعه‌های تجاری و مسکونی با مساحت بالا می‌باشند.

- طبقه بندی بر اساس عملکرد

به طور کلی سیستم‌های CCHP به دو روش مورد استفاده قرار می‌گیرند. سیستم‌هایی که تحت بار الکتریکی (FEL) عمل نموده و هدف عمده آن‌ها تأمین بار الکتریکی است و همچنین سیستم‌هایی که تحت بار حرارتی (FTL) عمل نموده

سیستم‌های انرژی مورد توجه اکثر کشورهای پیشرفته دنیا قرار گیرد. در این میان سیستم‌های CCHP در سال‌های اخیر به شدت مورد توجه قرار گرفته و استفاده از آن‌ها رو به افزایش است. استفاده از انرژی حرارتی خروجی از محرک‌های اولیه جهت تأمین برودت هدف عمده این نوع سیستم‌های انرژی می‌باشد. تولید برودت در این سیستم‌ها عمدتاً با استفاده از چیلرهای جذبی انجام گرفته و تولید حرارت نیز مشابه سیستم‌های CHP با استفاده از بازیاها و مبدل‌های حرارتی صورت می‌گیرد. مزیت عمده سیستم‌های CCHP تولید سه‌گانه انرژی حرارتی، برودتی و الکتریکی به طور همزمان بوده و این قابلیت راندمان سیستم را به‌طرز قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌دهد [۴-۷]. در شکل ۱ شماتیکی از نحوه عملکرد سیستم CCHP نشان داده شده است.

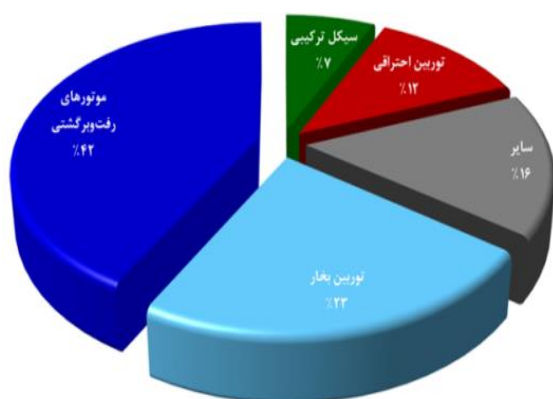


شکل ۱ شماتیکی از نحوه عملکرد سیستم CCHP

تفاوت مهم بین سیستم‌های CHP و CCHP این است که سیستم‌های CCHP فقط الکتریسیته و حرارت تولید نمی‌کنند، بلکه توانایی تولید بار برودتی را جهت کاربردهای مختلف دارند. در این میان نقش عمده در تولید برودت را چیلرها ایفا می‌کنند و می‌توانند آب سرد ۶ الی ۷ درجه سانتی‌گراد تولید کنند. آب سرد تولید شده توسط چیلرها می‌تواند در دستگاه‌های تهویه مطبوع مانند فن‌کویل و هواساز جهت سرمایش فضاها استفاده شود. از سوی دیگر می‌توان از این آب سرد در سایر بخش‌های صنعتی جهت خنک‌کاری تجهیزات، رطوبت‌گیری و... استفاده کرد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که در عمده سیستم‌های CCHP سرمایش فضاها اشغال شده مد نظر بوده و هدف تأمین آسایش حرارتی افراد می‌باشد. سیستم‌های CCHP بر خلاف سیستم‌های CHP دارای دو نوع محرک اولیه و ثانویه می‌باشند. محرک‌های اولیه اغلب مشابه سیستم‌های CHP بوده و هدف عمده آن‌ها تولید برق و انرژی الکتریکی می‌باشد، این در

¹ Following Electrical Load

² Following Thermal Load



شکل ۲ توزیع فراوانی محرک‌های به کار رفته در سیستم‌های CHP و CCHP [۱۲]



شکل ۳ موتور گازسوز ۱۶ سیلندر با توان الکتریکی خروجی ۹۰۰ کیلووات [۱۳]



شکل ۴ سیستم تولید همزمان با محرک اولیه موتور احتراق داخلی ۷۷۶ تا ۲۵۳۵ کیلووات [۱۳]

۳- روند توسعه سیستم‌های CCHP در جهان

در سال‌های اخیر گستره پروژه‌های انجام گرفته در زمینه CCHP رشد فراوانی داشته است. اطلاعات منتشر شده از این پروژه‌ها در سطوح گوناگون بوده و برخی با جزئیات بیان شده و برخی نیز به صورت کلی ارائه شده است. بر همین اساس طبق اطلاعات منتشر شده، پروژه‌ها دسته بندی گردید و در ادامه بیان شده‌اند.

و هدف آن‌ها تأمین بار حرارتی است. در روش عملکردی FEL هدف عمده سیستم تأمین بار الکتریکی است. محرک اولیه و ژنراتور وظیفه تأمین بار الکتریکی را بر عهده دارند. حرارت اتلافی از این نوع سیستم‌ها جهت تأمین بار حرارتی واحد بازیابی می‌شود. در صورتی که انرژی حرارتی بازیافتی برای تأمین بار حرارتی مورد نیاز (گرمایش و سرمایش) کافی نباشد، حرارت اضافی توسط دیگ بخار کمکی تأمین می‌شود. در روش عملکردی FTL هدف عمده سیستم تولید بار حرارتی برای تأمین نیاز بارهای گرمایشی و سرمایشی می‌باشد. اگر مقدار الکتریسته تولیدی برای تأمین نیاز واحد کافی نباشد، الکتریسته اضافی از شبکه وارد می‌شود.

- طبقه بندی بر اساس ارتباط با شبکه

این سیستم‌ها بر اساس ارتباط به شبکه به دو دسته وابسته به شبکه و مستقل تقسیم بندی می‌شوند. در حالت اتصال به شبکه سیستم CCHP به شبکه متصل بوده و قادر است در صورت کم بودن توان الکتریکی تولیدی نیاز مورد نیاز خود را از شبکه خریداری کند. در عملکرد مستقل نیز سیستم CCHP به شبکه متصل نبوده و همه نیازهای انرژی آن توسط خود سیستم و به طور مستقل تأمین می‌شود.

- دسته‌بندی از نظر محرک‌های اولیه

محرک اولیه جزء اصلی سیستم‌های تولید همزمان بوده و یکی از دغدغه‌های عمده مهندسان و طراحان سیستم‌های انرژی انتخاب یک محرک اولیه مناسب برای سیستم‌های CCHP می‌باشد. از انواع محرک‌های اولیه می‌توان به موتورهای رفت و برگشتی، توربین‌های گاز، میکروتوربین‌ها، توربین‌های بخار، پیل‌های سوختی و موتورهای استرلینگ اشاره کرد. در شکل ۲ توزیع فراوانی درصد استفاده از محرک‌های اولیه به کار رفته در سیستم‌های CHP و CCHP نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود موتورهای رفت و برگشتی بیشترین سهم را در این میان دارا می‌باشند [۱۲ و ۱۳].

همانطور که مشاهده می‌شود موتورهای رفت و برگشتی بیشترین کاربرد را به عنوان محرک اولیه در سیستم‌های CHP و CCHP دارا می‌باشند (شکل ۳ و ۴). بررسی‌ها نشان می‌دهد که در بین محرک‌های اولیه، پیل‌های سوختی و میکروتوربین کمترین میزان آلاینده‌گی را نسبت به سایر محرک‌ها دارند. حرارت و دمای گازهای خروجی از محرک‌های اولیه نقش مهمی در کارایی محرک‌های ثانویه جهت تولید بار سرمایشی و همچنین در مبدل‌های حرارتی برای تولید بار گرمایشی دارند.

جدول ۱ پروژه‌های CCHP انجام شده در جهان [۱۴-۱۶]

ردیف	شهر / کشور	محل اجرا	محرک اولیه	محرک ثانویه	راندمان ژنراتور برق	ظرفیت ژنراتور برق (کیلووات)	ظرفیت سرمایه‌شی (کیلووات)	راندمان کل (سرمایش و الکتریسیته)
۱	لیسبون پرتغال	مرکز خرید	موتورگازی	چیلر جذبی تک اثره	۳۹٪	۶۰۰۰	۳۶۰۰	۸۹٪
۲	ملبرن استرالیا	دیتاسنتر	موتورگازی	چیلر جذبی دو اثره	۳۸٪	۱۱۰۰	۱۹۴۰	۸۳٪
۳	مادرید اسپانیا	فرودگاه	موتورگازی	چیلر جذبی تک اثره	۴۱٪	۳۳۰۰۰	۱۹۸۰۰	۷۷٪
۴	کاسیلون اسپانیا	کارخانه تولید مواد شیمیایی	توربین گازی	چیلر جذبی دو اثره	۲۸٪	۱۳۴۳۰	۲۹۳۰	۷۳٪
۵	بلاروس	کارخانه تولید فیبر شیمیایی	موتورگازی	چیلر جذبی تک اثره	۴۰٪	۳۶۰۰۰	۱۵۰۰۰	۸۷٪
۶	امریکا سندیا گو	مرکز مخابرات	توربین گاز و خورشیدی	چیلر جذبی تک اثره	۳۵٪	۴۵۰۰	۴۶۰۰	۸۳٪
۷	امریکا نیوجرسی	دانشکده	موتورگازی	چیلر جذبی دو اثره	۳۸٪	۱۴۱۲	۱۴۵۴	۸۳٪
۸	امریکا کارولینای شمالی	پایگاه نظامی	توربین گاز و خورشیدی	چیلر جذبی دو اثره	۳۵٪	۵۲۰۰	۳۵۰۰	۹۳٪
۹	امریکا نیو جرسی	دانشگاه تحقیقاتی	موتورگازی	چیلر جذبی دو اثره	۳۸٪	۴۵۵۵	۲۳۲۶	۸۲٪
۱۰	هند دهلی	هتل ۷ ستاره	موتورگازی	چیلر جذبی دو اثره	۳۹٪	۲۲۰۰	۲۵۴۷	۶۹٪
۱۱	هند گرگاوان	مرکز خرید	موتورگازی	چیلر جذبی دو اثره	۳۸٪	۱۴۰۰	۴۲۱۰	۸۵٪
۱۲	روسیه مسکو	مرکز خرید محلی	موتورگازی	چیلر جذبی دو اثره	۳۸٪	۲۰۰۰	۳۰۰۰	۶۸٪
۱۳	هند گرگاوان	مرکز آی تی	موتورگازی	چیلر جذبی دو اثره	۳۸٪	۴۲۰۰	۱۴۴۹۱	۸۳٪
۱۴	هند دهلی	مرکز خرید	موتورگازی	چیلر جذبی دو اثره	۳۸٪	۱۴۰۰	۵۲۳۳	۸۵٪
۱۵	اسپانیا مالورکا	بیمارستان	موتورگازی	چیلر جذبی دو اثره	۴۱٪	۳۰۴۱	۱۷۶۶	۶۸٪
۱۶	هند گجرات	شرکت برج‌سازی	موتورگازی	چیلر جذبی دو اثره	۳۸٪	۴۵۰۰	۴۴۳۱	۸۱٪
۱۷	پاکستان کراچی	شرکت فیلم‌سازی	موتورگازی	چیلر جذبی دو اثره	۳۹٪	۲۰۵۵	۷۳۹۸	۹۷٪
۱۸	تایلند بانکوک	ساختمان اداری دولتی کارخانه	توربین گاز	چیلر جذبی دو اثره	۳۲٪	۵۵۰۰	۲۱۰۰۰	۹۴٪
۱۹	اندونزی جاکارتا	ماشین‌آلات نساجی	موتورگازی	چیلر جذبی دو اثره	۳۸٪	۱۶۰۰۰	۱۳۷۰۰	۸۱٪
۲۰	اندونزی سرپونگ	مرکز خرید	موتورگازی	چیلر جذبی دو اثره	۳۸٪	۲۲۰۰	۴۲۱۰	۸۲٪
۲۱	آلمان	ساختمان اسناد	موتورگازی	چیلر جذبی دو اثره	۳۸٪	۱۱۷۰	۷۵۶	۸۳٪

۲۲	مونیک استرالیا سیدنی	امنیته فرودگاه	موتورگازی	چیلر جذبی دو اثره	۳۹٪	۳۶۰۰	۳۳۱۵	۸۳٪
۲۳	استرالیا ملبورن	ساختمان تجاری	موتورگازی	چیلر جذبی دو اثره	۳۹٪	۱۲۰۰	۱۰۰۰	۸۳٪
۲۴	استرالیا ملبورن	دیتاسنتر بانک	موتورگازی	چیلر جذبی دو اثره	۳۸٪	۱۱۰۰	۱۹۴۰	۹۱٪
۲۵	استرالیا ملبورن	بیمارستان کودکان	موتورگازی	چیلر جذبی دو اثره	۳۸٪	۲۳۲۰	۲۵۵۰	۸۴٪
۲۶	مکزیک مکزیکوسیتی	ساختمان گیاهشناسی	موتور دیزل	چیلر جذبی دو اثره	۳۵٪	۹۳۰	۲۲۶۸	۶۵٪
۲۷	استرالیا سیدنی	ساختمان تفریحی	موتورگازی	چیلر جذبی دو اثره	۳۸٪	۱۱۰۰	۸۷۰	۸۲٪
۲۸	شیلی کاراکاس	بلندترین ساختمان تجاری	موتورگازی	چیلر جذبی دو اثره	۴۰٪	۱۴۴۰۰	۳۰۰۰۰	۸۴٪
۲۹	عربستان جده	بلندترین ساختمان تجاری	موتور دیزل	چیلر جذبی دو اثره	۳۸٪	۶۰۰۰	۱۱۶۰۰	۸۲٪
۳۰	کلمبیا بوگاتا	کارخانه نیکل	موتورگازی	چیلر جذبی دو اثره	۳۸٪	۱۷۵۰	۱۴۵۴	۷۱٪
۳۱	تونس انفیدا	فرودگاه	موتورگازی	چیلر جذبی دو اثره	۳۸٪	۴۳۴۹	۴۳۵۰	۸۴٪
۳۲	ترکیه استانبول	مرکز سرگرمی	موتورگازی	چیلر جذبی دو اثره	۳۸٪	۴۵۰۰	۵۶۹۰	۶۹٪

جدول ۲ پروژه‌های سازوکارهای حمایتی از سیستم‌های CHP و CCHP در کشورهای اتحادیه اروپا در سال ۲۰۱۶ [۱۵ و ۱۶]

کشور	حمایت مالیاتی	پرداخت بر اساس هزینه	پاداش فروش	طرح صدور گواهی	کمک مالی سرمایه	حمایت‌های دیگر	بدون حمایت
اتریش					✓		
بلژیک	✓			✓	✓		
جمهوری چک	✓		✓				
دانمارک						✓	
فنلاند				✓	✓	✓	
فرانسه	✓	✓	✓	✓		✓	
آلمان	✓	✓	✓				
یونان	✓					✓	
مجارستان							
ایرلند	✓	✓				✓	
ایتالیا	✓			✓		✓	
هلند	✓			✓	✓		
لهستان		✓					
پرتغال							
اسلوواکی			✓				
اسلونی						✓	
اسپانیا						✓	
انگلستان	✓						

۴- شرکت‌های فعال در زمینه CHP و CCHP

گسترش فزاینده استفاده از سیستم‌های CHP و CCHP، رشد فعالیت‌های صنعتی در این زمینه را سرعت بخشیده است به طوری که شرکت‌های بزرگ خارجی تمایل به فعالیت در این حوزه داشته‌اند. شرکت‌های فعال در زمینه سیستم‌ها CHP و CCHP بر اساس فعالیت به دو دسته اصلی تقسیم می‌شوند. شرکت‌هایی که در حوزه طراحی، محاسبه و انتخاب فعال هستند و شرکت‌هایی که پکیج سیستم‌های CHP و CCHP را در مقیاس‌های کوچک و متوسط تولید، نصب و راه‌اندازی می‌کنند. البته برخی از شرکت‌ها نیز در هر دو زمینه فعال بوده و پروژه‌های مختلفی انجام داده‌اند. از جمله شرکت‌ها بزرگ که در طراحی، نصب و راه‌اندازی و یا تولید پکیج‌های CHP و CCHP فعال هستند می‌توان به شرکت‌های بوش، کالوازاکی، زیمنس و براد اشاره کرد.

شرکت براد نیز از جمله شرکت‌های فعال در این حوزه می‌باشد. زمینه اصلی کار این شرکت طراحی و ساخت انواع چیلرهای جذبی می‌باشد و این شرکت ۳۵۰۰۰ پروژه در ۸۰ کشور داشته است. در شکل (۵) نمایی از سیستم نصب شده در یک مرکز خرید نشان داده شده است. نخستین چیلر جذبی شعله مستقیم نیز توسط این شرکت در سال ۱۹۹۲ تولید شد.

با توجه به کاربرد چیلرهای جذبی در سیستم‌های CCHP این شرکت نصب و راه‌اندازی پروژه‌های مختلفی از سیستم‌های CCHP را در دنیا انجام داده است. شرکت‌های دیگر نیز هستند که در حوزه طراحی، نصب و راه‌اندازی فعالیت دارند. اسامی برخی از آن‌ها در جدول ۳ ارائه شده است.

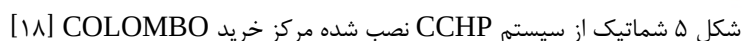
از شرکت‌های بزرگ حاضر در زمینه تولید پکیج‌های CHP و CCHP می‌توان شرکت صنعتی بوش را نام برد. محدوده توان الکتریکی پکیج‌های شرکت بوش از ۶۰۰ تا ۲۰۰۰ کیلووات الکتریکی می‌باشد. محدوده توان حرارتی این پکیج‌ها از ۳۳۳ تا ۱۰۵۳ کیلووات می‌باشد. محرک پکیج‌ها موتورهای احتراق داخلی رفت و برگشتی سیکل دیزل با سوخت گاز طبیعی هستند. این موتورها ساخت شرکت‌های MAN، MWM و MTU هستند. از دیگر شرکت‌های تولیدکننده پکیج می‌توان به شرکت Capstone Turbine Corporation (Horizon Power Systems) اشاره کرد. محرک اولیه پکیج‌های این شرکت همگی از نوع میکروتوربین هستند. محدوده توانی خروجی پکیج‌ها از ۲۸ تا ۱۰۰۰ کیلووات و محدوده نرخ توان حرارتی از ۱۴/۴ تا ۱۰/۹ مگاژول بر کیلووات ساعت می‌باشد [۱۷]. در جدول ۴ اسامی برخی دیگر از شرکت‌های تولید کننده پکیج‌های CHP و CCHP آمده است.

جدول ۳ شرکت‌های فعال در زمینه طراحی، نصب و راه‌اندازی سیستم‌های CHP و CCHP در جهان [۱۶]

ردیف	نام شرکت	کشور	وب سایت شرکت
۱	Kalor-Center Ltd	مجارستان	www.kalorcenter.hu
۲	Posco Energy	کره جنوبی	www.poscoenergy.com
۳	ON.E	آلمان	www.eon.com
۴	FuelCell Energy	آمریکای شمالی	www.fuelcellenergy.com
۵	Atrex Energy	آمریکای شمالی	www.atrexenergy.com
۶	Fuji Electric	ژاپن	www.fujielectric.com
۷	GEM Energy	آمریکا	www.gemenergycapstone.com
۸	Kraft Energy Systems	آمریکا	www.kraftenergysystems.com

جدول ۴ شرکت‌های فعال در زمینه تولید پکیج‌های CHP و CCHP در جهان [۱۶]

ردیف	نام شرکت	توان الکتریکی (کیلووات)	توان حرارتی (کیلووات)	کشور	وب سایت شرکت
۱	ago AG Energie + Anlagen	۱۴۳ تا ۵۳۲	۲۱۵ تا ۶۶۵	آلمان	www.ago.ag
۲	Viessmann	۶ تا ۵۳۰	۱۴/۹ تا ۶۶۰	آلمان	www.viessmann.com
۳	Solid Power	۱/۵	۰/۶	ایتالیا	www.solidpower.com
۴	2G Energy, Inc	۵۵۰ تا ۲۰۰۰	۶۰۶ تا ۱۹۷۵	آمریکا	www.2g-energy.com



ارائه شده از سوی وزارت نیرو پیش بینی بهره برداری از ظرفیت‌های جدید سیستم تولید همزمان برای سال‌های ۱۳۹۷ تا ۱۴۰۰ سالانه ۲۰۰ مگاوات می‌باشد. با توجه به محدود بودن پروژه‌های CCHP در ایران، در جدول ۵ پروژه‌های واقعی انجام شده در زمینه سیستم‌های CHP و CCHP معرفی و جزئیات موجود در آن‌ها ارائه می‌گردد.

با رشد روز افزون سیستم‌های تولید همزمان در جهان، ایران نیز در افق چشم انداز ۲۰ سال ۱۴۰۴ رشد و توسعه سیستم‌های تولید همزمان را مورد توجه قرار داده است. در این راستا ایران نیز همپای دیگر کشورها در مسیر توسعه سیستم‌های تولید همزمان گام بر می‌دارد. بر اساس آمارهای

جدول ۵ پروژه‌های انجام شده در زمینه CHP در ایران [۱۹]

آذربایجان شرقی							
ردیف	نام شرکت فروشنده برق	ظرفیت نامی قرارداد [MW]	ظرفیت عملی بهره‌برداری شده تاکنون [MW]	محل احداث	سال احداث	قرارداد با توانیر	محرك اوليه
۱	صنایع تجاری پارلا منسوجات	۶	۵/۸	شهرک صنعتی سرمایه‌گذاری خارجی	۹۰	دارد	Caterpillar
۲	خدماتی کشاورزی یاشیل آراین	۲/۱	۱/۹	جاده تبریز-آذر شهر، روبروی نیروگاه حرارتی تبریز	۹۲	دارد	Guascor
	مجموع	۸/۱	۷/۷				
آذربایجان غربی							
ردیف	نام شرکت فروشنده برق	ظرفیت نامی قرارداد [MW]	ظرفیت عملی بهره‌برداری شده تاکنون [MW]	محل احداث	سال احداث	قرارداد با توانیر	محرك اوليه
۱	اروم پک	۷/۱	۲	ارومیه، جاده ارومیه- مهاباد	۹۴	دارد	Caterpillar
	مجموع	۷/۱	۲				
اصفهان							
ردیف	نام شرکت فروشنده برق	ظرفیت نامی قرارداد [MW]	ظرفیت عملی بهره‌برداری شده تاکنون [MW]	محل احداث	سال احداث	قرارداد با توانیر	محرك اوليه
۱	ریسندگی بهار ریس اصفهان	۴/۷۶	۴	منطقه صنعتی دهق، خیابان هیئت اماناء	۸۹	دارد	Guascor
۲	تعاونی بهنام انرژی نائین	۲/۱	۱/۸	شهرک صنعتی نائین	۹۰	دارد	Guascor

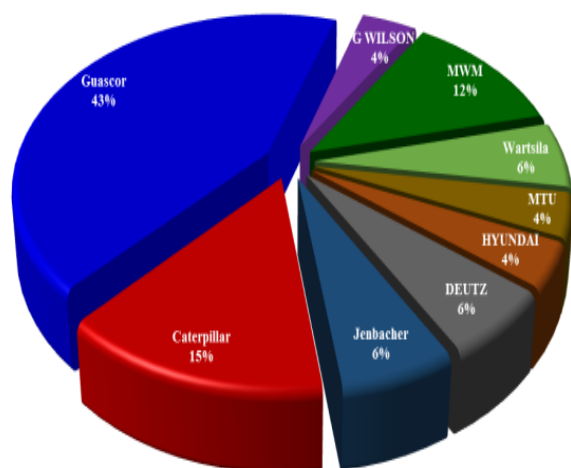
۳	مؤسسه صندوق رفاه اعضای هیئت علمی دانشگاه کاشان	۱	۱	محل دانشگاه کاشان، خودتأمین	۹۱	دارد	FG WILSON
۴	صعود گستر آسیا- سگری ۲	۲۵/۵	۲۵	اتصال به پست ۲۰/۶۳ سگری ۲ (عمار)	۹۳	دارد	Wartsila
۵	توان امید پاسارگاد	۱۷/۱	۶	شهررضا، شهرک صنعتی رازی	۹۴	دارد	Guascor
۶	مجتمع نیروگاهی توان امید صفاهان	۱۷/۱	۱۵/۸	شهرک صنعتی میمه	۹۴	دارد	Guascor
۷	تعاونی روستایی عدالت طالخنچه	۵/۱	۱	شهرک صنعتی مبارکه	۹۴	دارد	MWM
۸	نوین برق آيسان	۵/۱	۱	شهرک صنعتی مبارکه	۹۴	دارد	MWM
مجموع		۷۷/۷۶	۵۵/۶				
تهران							
ردیف	نام شرکت فروشنده برق	ظرفیت نامی قرارداد [MW]	ظرفیت عملی بهره‌برداری شده تاکنون [MW]	محل احداث	سال احداث	قرارداد با توانیر	محرك اوليه
۱	تانیر-کن	۶/۲	۵/۴	محدوده پست ۲۰/۶۳ کیلوولت کن	۹۰	دارد	Guascor
۲	تانیر-معنوی	۱۰/۳	۹/۳	محدوده پست ۲۰/۶۳ کیلوولت معنوی	۹۱	دارد	Guascor
۳	تولید ایستگاهی نیرو خاصه	۱	۱	محل نیروگاه طرشت	۸۸	خاتمه دوره خرید	FG WILSON
۴	تولید ایستگاهی نیرو ویژه	۱	۰/۹	محل نیروگاه طرشت	۹۰	دارد	Guascor
۵	تانیر کاشانی	۶/۲	۵/۷	محدوده پست ۲۰/۶۳ کیلوولت کاشانی	۹۰	دارد	Guascor
۶	صنعت یاران نیروگاهی ایرانیان (میناکو)	۷/۲	۷	شهرک آزمایش	۹۱	دارد	Guascor
۷	طراحی مهندسی کمپرسور نفت آسیا	۳/۸	۳/۸	شهرک صنعتی شمس‌آباد، بلوار مهستان، خیابان گلسترخ ۳ و ۵	۹۰	دارد	Guascor
۸	گاسکور پارس آریا	۰/۶	۰/۵	محل نیروگاه طرشت	۹۰	خاتمه دوره خرید	Guascor
۹	مهندسی، توسعه و تولید صنعت انرژی برق خاورمیانه (میکو)	۶	۶	میدان مرکزی میوه و تره‌بار	۹۲	دارد	Caterpillar
۱۰	تولید ایستگاهی نیرو خاصه	۲	۱	بوستان گفتگو	۹۲	خاتمه دوره خرید	Guascor
۱۱	کاوش پیام پاسارگاد- مرکز باهنر	۱/۱	۱	خیابان شریعتی، بالاتر از دولت، مرکز تلفن باهنر	۹۲	دارد	MWM
۱۲	تولید ایستگاهی نیرو ویژه- خوارزمی	۱۳/۳	۱۲/۸	پست فوق توزیع شهرک صنعتی عباس‌آباد	۹۳	دارد	Guascor
۱۳	پایا دیاکو آسیا	۹/۶	۶	پست ۲۰/۶۳ کیلوولت لویزان	۹۳	دارد	Wartsila
۱۴	پارسیا گاز آسیا فراز	۴/۲	۲	اتصال به فیدر گل آژین از پست فوق توزیع شمس‌آباد	۹۴	دارد	Wartsila
۱۵	تولید ایستگاهی نیرو واحد (تانیر)	۲۵	۲۴	محدوده پست ۲۰/۶۳ کیلوولت شهرک شوش	۹۴	دارد	Guascor
۱۶	امیران	۴	۴	برج میلاد	۹۴	دارد	MTU
۱۷	نیرو پارسه	۸/۳	۸	ستارخان، نیروگاه شهید فیروزی	۹۴		HYUNDAI

۱۸	صبا باتری	۳	۳	محل کارخانه صبا باتری	۹۴	Guascor	
مجموع		۱۱۲/۸	۱۰۱/۴				
چهارمحال و بختیاری							
ردیف	نام شرکت فروشنده برق	ظرفیت نامی قرارداد [MW]	ظرفیت عملی بهره‌برداری شده تاکنون [MW]	محل احداث	سال احداث	قرارداد با توانیر	محرك اولیه
۱	ساختمانی برکه-بروجن	۶	۴	منطقه صنعتی بروجن	۹۳	دارد	Caterpillar
مجموع		۶	۴				
خراسان رضوی							
ردیف	نام شرکت فروشنده برق	ظرفیت نامی قرارداد [MW]	ظرفیت عملی بهره‌برداری شده تاکنون [MW]	محل احداث	سال احداث	قرارداد با توانیر	محرك اولیه
۱	کارخانجات ریسندگی، بافندگی و پوشاک جامعه	۴/۱	۳/۷	مشهد، کیلومتر ۷ جاده کلات	۹۱	دارد	Guascor
۲	رنگین کمان سناباد	۷/۹	۳	مشهد، منطقه نمونه ملی گردشگری سپاد، قطعه ۱۸۸	۹۲		Jenbacher
۳	صنعت یاران انرژی فدک قدر	۴/۷	۳	مشهد، پایانه مسافربری مشهد	۹۳		MTU
۴	مجتمع ولیعصر	۲/۸	۲/۷	مشهد، خیابان خواجه ربیع، خیابان ولی عصر، مجتمع ولی عصر	۹۴	دارد	DEUTZ
مجموع		۱۹/۵	۱۲/۴				
خراسان شمالی							
ردیف	نام شرکت فروشنده برق	ظرفیت نامی قرارداد [MW]	ظرفیت عملی بهره‌برداری شده تاکنون [MW]	محل احداث	سال احداث	قرارداد با توانیر	محرك اولیه
۱	استحکام سازه بجنورد	۱/۹	۱	شهرک صنعتی شیروان	۹۱	دارد	Guascor
مجموع		۱/۹	۱				
فارس							
ردیف	نام شرکت فروشنده برق	ظرفیت نامی قرارداد [MW]	ظرفیت عملی بهره‌برداری شده تاکنون [MW]	محل احداث	سال احداث	قرارداد با توانیر	محرك اولیه
۱	نیرو ساخت جاوید پارس	۶	۳/۵	شهرک صنعتی همایجان، قطعه ۱۰، بلوک الف	۹۲ ۹۳	دارد	Jenbacher
۲	فنی مهندسی محسن نیروی پارس	۲/۳	۱	شهرک صنعتی فیروزآباد	۹۲	دارد	Caterpillar
۳	تعاونی حدیث مهر پارس	۱۶/۸	۱۵	شیراز، شهرک صنعتی بزرگ شیراز، بلوک gco	۹۳	دارد	HYUNDAI
۴	فرقان شیمی شیراز	۶	۵/۷	منطقه شیراز، شهرک صنعتی آب باریک، سمت راست، کوچه	۹۳	دارد	Jenbacher

۴							
۵	خدمات کشاورزی خوشه پرور مرودشت	۸/۴	۶	شهرستان مرودشت	۹۴	دارد	MWM
مجموع		۳۹/۵	۳۲/۲				
قزوین							
ردیف	نام شرکت فروشنده برق	ظرفیت نامی قرارداد [MW]	ظرفیت عملی بهره‌برداری شده تاکنون [MW]	محل احداث	سال احداث	قرارداد با توانیر	محرك اولیه
۱	نفیس نخ	۴	۳/۴	شهرک صنعتی لیا، شرکت نفیس نخ	۸۸	خاتمه دوره خرید	Guascor
۲	نگین برق قزوین	۱/۴	۱/۲	جاده روستای لیا	۹۱	دارد	DEUTZ MWM
۳	بانیان رسا قدرت کاسپین	۵/۸	۳/۹	شهرک صنعتی کاسپین	۹۳	دارد	Caterpillar
۴	دسترنج رضا بافت	۱۰	۱۰	آزادراه قزوین - تهران، کیلومتر ۳۵، بعد از نیروگاه ۲۰۰۰ مگاواتی شهید رجایی	۹۳	دارد	Guascor
۵	نساجی میهن مهر	۱۵/۶	۸	شهرک صنعتی البرز	۹۴	دارد	Caterpillar
۶	یاس نخ البرز	۷/۸	۴	شهرک صنعتی البرز، خیابان حکمت، خیابان علامه قزوینی، شرکت یاس نخ	۹۴	دارد	DEUTZ MWM
مجموع		۴۴/۶	۳۰/۵				
قم							
ردیف	نام شرکت فروشنده برق	ظرفیت نامی قرارداد [MW]	ظرفیت عملی بهره‌برداری شده تاکنون [MW]	محل احداث	سال احداث	قرارداد با توانیر	محرك اولیه
۱	مهندسی ری نیرو	۵/۳	۵/۲	جاده قدیم قم-تهران، جنب پست معصومیه	۹۲	دارد	Guascor
مجموع		۵/۳	۵/۲				

در شکل (۶) سهم هر استان در بهره‌برداری از سیستم‌های CHP ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود سهم استان تهران و اصفهان در استفاده از این سیستم‌ها بیشتر از بقیه استان‌ها می‌باشد [۱۹]. در شکل ۷ نیز سهم هر کدام از شرکت‌های تولیدکننده محرک‌های رفت و برگشتی در ایران ارائه شده است. در این بخش نیز سهم شرکت‌های Guascor و Caterpillar از همه بیشتر می‌باشد [۱۹]. کاربرد سیستم‌های CHP بیشتر در اقلیم‌های سرد مورد توجه بوده است، زیرا در این مناطق تولید گرمایش در کنار تولید برق حائز اهمیت می‌باشد. اما در اقلیم‌هایی که در طی سال شرایط آب و هوایی گوناگون سرما و گرما را تجربه می‌کنند، سیستم‌های

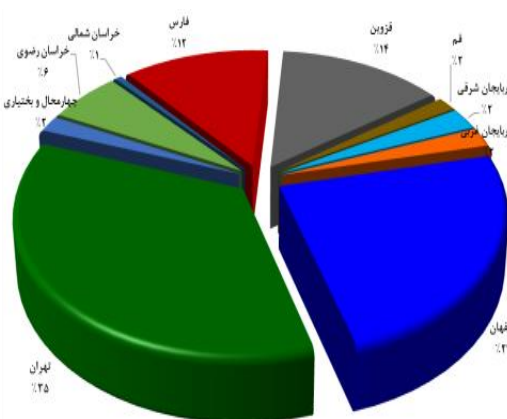
تولید همزمان حرارت، برودت و برق (CCHP) بیشتر مورد توجه می‌باشد. از این رو با توجه به گستره اقلیمی در ایران و وجود مناطق گرم فراوان فعالیت‌های علمی زیادی در زمینه سیستم‌های CCHP انجام گرفته است. در کنار این فعالیت‌های علمی و دانشگاهی پروژه‌های مختلفی نیز اجرا گردیده است. شرایط اقلیمی برخی از مناطق ایران به گونه‌ای است که در طی برخی از فصول نیاز به سیستم‌های تولید همزمان حرارت و برودت در کنار تولید برق می‌باشد. در استفاده از سیستم‌های CCHP در اقلیم‌های مختلف باید به محدودیت‌های اجباری تحمیل شده توسط این سیستم توجه کرد. یکی از موارد مهم در استفاده از این سیستم وجود چیلر جذبی و برج خنک‌کن



شکل ۷ سهم هر کدام از شرکت‌های تولیدکننده محرک‌های رفت و برگشتی در ایران [۱۹]

مشخصات کامل سه نمونه از پروژه‌های انجام شده داخل کشور که مجهز به سیستم CCHP می‌باشند، در جدول ۶ آورده شده است.

می‌باشد. برج‌های خنک کن وظیفه خنک کردن جاذب و کندانسور چیلرهای جذبی را بر عهده دارد. استفاده از برج‌های خنک کن دارای محدودیت می‌باشد. مناطق مرطوب، مناطق کم آب، مناطق با هوای غبار آلود و مناطق دارای آب با املاح بالا چهار منطقه‌ای هستند که استفاده از برج خنک کن در آنها توصیه نمی‌شود. لذا در استفاده از سیستم‌های CCHP باید به این مساله توجه کرد. البته با تمهیداتی می‌توان این مشکل را در این سیستم‌ها رفع نمود.



شکل ۶ سهم هر استان از سیستم‌های تولید همزمان برق و حرارت [۱۹]

جدول ۶ پروژه‌های انجام شده در زمینه CCHP در ایران [۱۹]

ردیف	شهر	محل اجرا	محرک اولیه	محرک سرمایه‌ش	محرک ثانویه	راندمان ژنراتور برق	ظرفیت ژنراتور برق (کیلووات)	ظرفیت سرمایی (کیلووات)	راندمان کل (سرمایش و الکتریسیته)
۱	کیش	نیروگاه	توربین گاز	چیلر جذبی دو اثره	بخار خروجی از مبدل دایرکت فایر و	۲۸٪	۳۶۰۰۰	۱۷۵۸۰	۸۱٪
۲	مشهد	تجاری آکسون	موتورگازی	چیلر جذبی دو اثره	اگزاست و آب گرم	۳۹٪	۴۵۰۰	۵۲۷۴	۸۶٪
۳	رشت	بیمارستان ۱۶۰ تختخوابی	موتورگازی	چیلر جذبی دو اثره	اگزاست و آب گرم	۳۶٪	۲۰۰۰	۲۴۶۱	۷۹٪

تأمین این میزان مصرف حجم سرمایه گذاری‌های سنگینی را بر حوزه نیروگاهی، شبکه انتقال و سیستم توزیع برق کشور، تحمیل می‌نماید. از عوامل مهم در این افزایش بی‌رویه مصرف انرژی در حوزه سرمایش می‌توان به تغییر الگوی رفاه جامعه از استفاده از کولرهای سرمایش تبخیری به سمت سیستم‌های تراکمی با افزایش ۲۰۰ الی ۴۰۰ درصدی مصرف انرژی الکتریکی، عدم تولید محصولات سرمایش تراکمی با رده انرژی مناسب در داخل کشور، ورود حجم قابل توجهی کالای قاچاق

۶- ارائه مدل کسب و کار پیشنهادی واحدهای CCHP با توجه به دیدگاه حاکمیتی، مصرف‌کننده و تولیدکننده

یکی از مصارف عمده انرژی الکتریکی در داخل کشور در حوزه سرمایش بوده که در سالیان اخیر سهم قابل توجهی از بار پیک شبکه را به خود اختصاص داده است. با توجه به بررسی‌های صورت گرفته نزدیک به ۲۰ گیگاوات از میزان بار الکتریکی شبکه در اوج مصرف مرتبط با سیستم‌های سرمایشی بوده که

صورت نیاز
مزیت‌های سیستم‌های CCHP از دیدگاه تولید کننده
۱- اهمیت تولید موتورهای مگاواتی به عنوان محرک صنعت کشور در حوزه تولید مقیاس پراکنده، حمل و نقل دریایی و ریلی. ۲- عدم وابستگی به واردات موتورهای مگاواتی که اکثراً یا تولید کمپانی‌های آمریکایی بوده و یا دارای یک سهام دار آمریکایی می‌باشند. ۳- عدم نیاز به واردات قطعات حساس موتور مگاواتی که هم اکنون با سختی و دشواری تأمین می‌گردد. ۴- بومی‌سازی قطعات سیستم استحصال حرارت و سیستم کنترلی و همچنین توانمندی یکپارچه سازی که تاکنون در درصد بالایی صورت گرفته است. ۵- طراحی و ساخت و بومی سازی چیلرهای جذبی با راندمان بالا به منظور بهره برداری از انواع منابع حرارت استحصالی.

– مسئولیت‌های مورد انتظار در این حوزه کسب و کار (CCHP) از دیدگاه حاکمیتی، مصرف‌کننده و تولیدکننده

مسئولیت‌های مورد انتظار در این حوزه کسب و کار (CCHP) از دیدگاه حاکمیتی، مصرف‌کننده و تولیدکننده موضوع مهمی می‌باشد که بخشی از آن در جدول ۸ پیشنهاد شده است.

جدول ۸ مسئولیت‌های مورد انتظار در این حوزه کسب و کار CCHP

مسئولیت‌های مورد انتظار از دیدگاه حاکمیتی
۱- تأمین گاز نیروگاهی با تعرفه ۵۰ ریال به ازای هر متر مکعب در کاربرد تزریق کامل برق به شبکه سراسری ۲- تأمین گاز با تعرفه خود تأمین ۵۰۰ ریال به ازای هر متر مکعب برای واحدهای تأمین کننده برق خود ۳- وضع تعرفه مناسب برای واردات تجهیزات اصلی واحدهای تولید همزمان حرارت، برودت و توان الکتریکی (CCHP) شامل موتور گازسوز، مبدل و چیلرهای جذبی به صورتی که در ابتدا از شکل گیری کسب و کار حمایت شود و در ادامه از بومی سازی و تولید داخلی قطعات اصلی حمایت شود. ۴- ارائه تسهیلات ارزان قیمت به منظور توسعه واحدهای تولید همزمان حرارت، برودت و توان الکتریکی (CCHP) در مناطق مستعد کشور (به خصوص نواحی گرم و خشک) ۵- قرار دادن پروژه‌های تولید همزمان حرارت، برودت و توان الکتریکی (CCHP) در لیست پروژه‌های تحت پوشش پروژه ارتقاء راندمان موتورخانه‌های مسکونی و اداری شرکت بهینه‌سازی مصرف سوخت ۶- افزایش تعرفه گاز واحدهای مسکونی و اداری دارای چیلرهای

(کولرهای گازی تبرید تراکمی) به داخل کشور که عملاً نظارت خاصی بر میزان مصرف انرژی آن‌ها وجود ندارد و همچنین عدم تنظیم دمای مناسب محیط‌های عمومی، اداری و حتی منازل در فصل گرم اشاره کرد. با عنایت به موارد فوق دو راه حل اساسی به منظور رفع مشکل تشریح شده پیشنهاد می‌گردد.

الف) صرفه جویی در مصرف انرژی الکتریکی با تنظیم مناسب دمای محیط و همچنین بکارگیری تجهیزات با راندمان انرژی بالا

ب) توسعه روش‌های تأمین برودت به سمت بهره برداری از منابع اتلافی انرژی و همچنین استفاده از منابع انرژی که کشور در تأمین آن دارای مزیت نسبی می‌باشد که گاز طبیعی از جمله این موارد می‌باشد.

– مزیت‌های واحدهای CCHP با توجه به دیدگاه حاکمیتی، مصرف‌کننده و تولیدکننده

مزیت‌های سیستم‌های CCHP از دیدگاه حاکمیتی، مصرف‌کننده و تولیدکننده در جدول (۷) ارائه شده است.

جدول ۷ مزیت‌های سیستم‌های CCHP

مزیت‌های سیستم‌های CCHP از دیدگاه حاکمیتی
۱- کاهش مصرف انرژی با توجه به تولید همزمان حرارت و برودت و توان الکتریکی از یک منبع انرژی فسیلی ۲- جلوگیری از خروج ارز از کشور به واسطه بومی سازی قطعات اصلی سامانه ۳- ایجاد اشتغال پایدار در صورت توسعه حوزه کسب و کار جدید ۴- جلوگیری از خاموشی شبکه بدلیل کاهش بار برودتی شبکه در فصول گرم ۵- کاهش شدت مصرف انرژی مطابق اسناد بالادستی ۶- کاهش پیک بار ۲۰۰ ساعته شبکه در اثر برودت (بخصوص در مناطق گرم و خشک) ۷- تقویت زیرساخت‌های شبکه بدلیل تزریق برق به شبکه سراسری مانند پست‌های فشار ضعیف و فشار متوسط
مزیت‌های سیستم‌های CCHP از دیدگاه مصرف کننده
۱- دستیابی به منبع انرژی الکتریکی و برودت باکیفیت مطلوب و بدون نوسان ۲- استقلال از شبکه سراسری برق و به طبع آن تأمین و عرضه پایدار یوتیلیتی ۳- قرارگرفتن در اولویت‌های نهایی قطع برق و گاز از شبکه سراسری ۴- افزایش ضریب پدافند غیرعامل بدلیل افزایش منابع ورودی‌های جریان انرژی ۵- پایداری روند تولید و عدم توقف آن بدلیل استقلال از شبکه در

الکتریکی (CCHP) و تدوین نقشه راه حوزه CCHP در کشور (بخش کسب و کار) اشاره کرد.

۷- جمع بندی

با بررسی کارهای صورت گرفته در زمینه سیستم‌های CCHP در ایران می‌توان موارد ذیل را به عنوان جمع‌بندی کار اشاره کرد:

- یکی از مصارف عمده انرژی الکتریکی در داخل کشور در حوزه سرمایش بوده که در سالیان اخیر سهم قابل توجهی از بار پیک شبکه را به خود اختصاص داده است. استفاده از سیستم‌های CCHP می‌تواند کمک زیادی در خصوص کاهش مصرف برق ایجاد نماید. توسعه ضریب پدافند غیر عامل (عدم وابستگی به انرژی الکتریکی شبکه) از دیگر مزایای این سیستم می‌باشد.
- بررسی کارهای واقعی انجام شده نشان می‌دهد که محرک اولیه در بیشتر سیستم‌های موجود در ایران موتورهای رفت و برگشتی گازسوز می‌باشد.
- بررسی کارهای واقعی انجام شده نشان می‌دهد که محرک ثانویه در بیشتر سیستم‌های موجود در ایران چیلرهای جذبی می‌باشد.

- در خصوص توانمندی و بومی‌سازی سیستم‌های CCHP در ایران، می‌توان به قابلیت بالای شرکت‌های داخلی در ساخت و تولید هر کدام از بخش‌های این سیستم شامل موتور گازسوز، مبدل حرارتی، ژنراتور، ترانسفورماتور، چیلر جذبی و ... اشاره کرد.
- ارائه بسته سیاستی کسب و کار در حوزه CCHP نیز موضوع مهمی است که باید مورد توجه قرار گیرد.

۸- تقدیر و تشکر

بدینوسیله از حمایت‌های مالی و معنوی شرکت توانیر و پژوهشگاه نیرو در انجام این تحقیق قدردانی می‌گردد.

۹- مراجع

- [1] Kang, L., Wu, X., Yuan, X., Ma, K., Wang, Y., Zhao, J., An, Q., Influence analysis of energy policies on comprehensive performance of CCHP system in different buildings, *Energy*, Volume 233, (2021).
- [2] Pirkandi, j., Joharchi, AM., Ommian, M., Thermodynamic and exergic modelling of a combined cooling, heating and power system based on solid oxide fuel cell, *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, Vol 13 (4), pp. 6088-6111, (2019).

جذبی در فصول گرم (هم اکنون این عدد بالاتر می‌باشد) به منظور تشویق به تغییر سیستم به سامانه تولید همزمان حرارت، برودت و توان الکتریکی (CCHP)

مسئولیت‌های مورد انتظار از دیدگاه مصرف کننده

- ۱- تأمین منابع مالی اولیه و تعهد بازپرداخت تسهیلات تعلق گرفته
- ۲- اعتماد به تجهیزات تولید داخل در صورت اخذ استانداردهای لازم
- ۳- بهره برداری از تجهیزات طبق استانداردهای موجود در شبکه
- ۴- تعمیرات و نگهداری تجهیزات طبق دستور العمل‌های سازنده

مسئولیت‌های مورد انتظار از دیدگاه تولید کننده

- ۱- تأمین و طراحی موتورهای گازسوز و قطعات حساس آن با راندمان‌های مورد پذیرش وزارت نیرو (در این زمینه می‌توان طبق آیین‌نامه‌ای تا یک دوره ۵ ساله تخفیفات مناسبی در راندمان انرژی الکتریکی تولیدی به تولید کننده داخلی ارائه نمود)
- ۲- طراحی و ساخت تجهیزات استحصال حرارت و ادوات کنترلی مربوطه
- ۳- طراحی و ساخت چیلرهای جذبی راندمان بالا

- متولیان و ذی نفعان حوزه کسب و کار CCHP

- از متولیان و ذی نفعان حوزه کسب و کار CCHP می‌توان به بخش‌های ذیل اشاره کرد.
- شرکت ملی گاز ایران (تأمین گاز ورودی به نیروگاه تولید همزمان حرارت، برودت و توان الکتریکی (CCHP))
- شرکت بهینه سازی مصرف سوخت کشور (گاز صرفه جویی شده در واحدهای تولید همزمان حرارت، برودت و توان الکتریکی (CCHP))
- سازمان انرژی‌های تجدیدپذیر و بهره وری انرژی برق (ساتبا) (کاهش مصرف برق بروdotی)
- سازمان گسترش و نوسازی صنایع ایران (تولید داخل تجهیزات)
- دانشگاه‌های صنعتی کشور (حوزه دانشی مبحث)
- بخش خصوصی دانش بنیان (تولید قطعات حساس)
- بخش خصوصی (کسب و کار حوزه مورد بررسی)

- ارائه بسته‌های سیاستی کسب و کار در حوزه CCHP

ارائه بسته سیاستی کسب و کار در حوزه CCHP نیز موضوع مهمی است و در این خصوص می‌توان به مواردی مانند ارائه بسته حمایتی از محصولات تولیدی داخل کشور، ارائه بسته حمایتی در قالب تسهیلات، ارائه بسته حمایتی تعرفه خرید برق تضمینی واحدهای تولید همزمان حرارت، برودت و توان الکتریکی (CCHP)، ارائه بسته حمایتی تعرفه گاز طبیعی ورودی واحدهای تولید همزمان حرارت، برودت و توان

- [10] Pirkandi, J., Ommian, M., Thermo-Economic Operation Analysis of SOFC–GT Combined Hybrid System for Application in Power Generation Systems, *Journal of Electrochemical Energy Conversion and Storage*, Vol 16 (1), pp. 1-12, (2019).
- [11] Mancarella, P., and Chicco, G., Assessment of the greenhouse gas emissions from cogeneration and trigeneration systems. Part II: Analysis techniques and application cases, *Energy*, Vol. 33(3), pp. 418-430, (2008).
- [12] Caterpillar, https://www.cat.com/en_MX.html, (2019).
- [13] Rolls-Royce, MTU Onsite Energy showcases biogas cogeneration modules at Agritechnica, (2019).
- [14] COGEN Europe, COGEN europe national snapshot survey, (2016).
- [15] Chen W.D. and Chua K.J., A novel and optimized operation strategy map for CCHP systems considering optimal thermal energy utilization, *Energy*, Vol 259, (2022).
- [16] Cogeneration Observatory and Dissemination Europe (CODE), European Summary Report on CHP support schemes – a comparison of 27 national support mechanisms, (2019).
- [17] Capstone Turbine Corporation, <https://www.capstoneturbine.com/>, (2019).
- [18] BROAD DISTRIBUTED ENERGY CASE STUDIES," <https://www.broadeu.com/en>, (2019).
- [19] IranCHP, <http://www.irancchp.ir/>, (2019).
- [3] Salimi, M., Hosseinpour, M., Mansouri, Sh. and N.Borhani, T., Environmental Aspects of the Combined Cooling, Heating, and Power (CCHP) Systems: A Review, *Processes*, Vol 10(4), (2022).
- [4] Liu, M., Shi, Y., and Fang, F., Combined cooling, heating and power systems: A survey, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 35, pp. 1-22, (2014).
- [5] Ahmadi, G., Toghraie, D., and Akbari, O., Energy, exergy and environmental (3E) analysis of the existing CHP system in a petrochemical plant, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 99, pp. 234-242, (2019).
- [6] Asadi, R., Assareh, E., Moltames, R., Olazar, M., Nedaei, M. and Parvaz, F., Optimisation of combined cooling, heating and power (CCHP) systems incorporating the solar and geothermal energy: a review study, *International Journal of Ambient Energy*, Vol 43, pp. 42-60, (2022).
- [7] Bagherian, M.A., Mehranzamir, K., Beiranvand Pour, A., Rezaia, Sh., Taghavi, E., Nabipour-Afrouzi, H., Dalvi-Esfahani, M., and Alizadeh, S.M., Classification and Analysis of Optimization Techniques for Integrated Energy Systems Utilizing Renewable Energy Sources: A Review for CHP and CCHP Systems, *Processes*, Vol 9, (2021).
- [8] Norouzi, N., Peydayesh, Y., Talebi, S., Fani, M., CHP coupled with a SOFC plant, *Hybrid Power Cycle Arrangements for Lower Emissions*, CRC Press, pp. 93-115, (2022).
- [9] Wilberforce, T., Olabi, A.G., TahaSayed, E., Elsaid, Kh., Maghrabie, H.M., Abdelkareem, M.A., A review on zero energy buildings – Pros and cons, *Energy and Built Environment*, Vol 4, pp. 25-38, (2023).