



بررسی چگونگی خوردگی در تیر یک سر بسته

پوهندوی دکتور عارف نعیم‌زاد^۲

تقریظ‌دهنده: پوهنوال دکتور عبدالقیوم کریم

مجله‌ی علمی-تحقیقی حوزه‌ی علوم
طبیعی پوهنتون کابل، ۲ (۳) ۱۳۹۹

چکیده

خوردگی با این که سبب کاهش ناچیز کتله در ساختارهای انجیری می‌گردد اما باعث تقلیل چشم‌گیر در مقاومت مکانیکی و عمر مواد خورده‌شده می‌شود. بنابراین، حفظ سلامتی یک ساختار که در یک محیط خورنده قرار دارد، می‌تواند وضعیت ساختار در هر زمان را نشان داده و سبب جلوگیری از لطمات وارده و هزینه‌های ناشی از آن شود. هدف از این پژوهش، بررسی توانایی روش امیدانس الکترومکانیکی در تشخیص خوردگی می‌باشد و با استفاده از پیزوالکتریک به بررسی ابعاد عیب‌ها بر روی یک تیر یک سر بسته پرداخته شده است. جهت تشخیص کمی عیب به صورت سنتی، از معیار آسیب اسکالر استفاده شده است. با توجه به نمودارهای به دست آمده در بحث تحلیلی و تجربی، به وضوح دیده می‌شود که پیزوالکتریک در هر دو بحث قادر به تشخیص ابعاد عیب‌ها می‌باشد.

اصطلاحات کلیدی: خوردگی فلزات؛ محیط خورنده؛ امیدانس الکترومکانیکی؛ حفظ سلامتی ساختار

Study on Corrosion Aspects in a Cantilever Beam

Asstt. Prof. Dr. Aref Naimzad

Abstract

Although corrosion causes a slight reduction in the engine's structure, corrosion causes a significant reduction in the mechanical strength and service life of the materials. Therefore, maintaining the health of a structure that is in a corrosive environment can reflect the status of the structure at any time and prevent damage and costs. The purpose of this study was to investigate the ability of electromechanical impedance method to detect corrosion and to study the defect dimensions on a cantilever beam using piezoelectric. Traditionally, the Scalar Injury Criterion has been used to diagnose quantitative defects traditionally. According to the diagrams obtained in the analytical and empirical discussion, it is clearly seen that the piezoelectric can detect the defect dimensions in both discussions.

Keywords: Metal corrosion; Corrosive environment; Electromechanical impedance; Structural health.

ارجاع

نعیم‌زاد، عارف. ۱۳۹۹. بررسی چگونگی خوردگی در تیر یک سر بسته. مجله‌ی علمی-تحقیقی حوزه‌ی علوم طبیعی پوهنتون کابل، شماره ۲ (۳)، صص ۲۵ - ۳۶.

^۲استاد پوهنخی انجیری، پوهنتون کابل

مقدمه

حفظ سلامتی ساختارهای انجینری یک زمینه تحقیقاتی مهم با کاربردهای چندگانه است که به بررسی وضعیت و سلامتی ساختارها و تخمین عمر آنها می پردازد و قادر به اندازه گیری و حفظ بلادرنگ از وضعیت ساختارها می باشد (۱). این روش یک ابزار قوی برای صرفه جویی در زمان کاهش هزینه های ترمیم و نگهداری می باشد که می تواند خطاهای انسانی را کاهش دهد (۲).

حفظ سلامتی ساختارها به صورت فعال و غیرفعال انجام می شود. حفظ سلامتی ساختار به صورت غیرفعال پارامترهای مختلفی از ساختار را اندازه گیری و سپس با استفاده از این پارامترها سلامتی ساختار را تعیین می کند (۳). حفظ به صورت غیرفعال مفید است ولی نمی تواند به طور مستقیم مشکل را مشخص نماید (۴).

از طرف دیگر، حفظ به صورت فعال به طور مستقیم با حالات سلامت ساختار در ارتباط است که هدف از این ارتباط تلاش برای کشف وجود و یا گسترش عیب می باشد (Park, G. et al, 2003). با توجه به این موضوع، روش حفظ سلامتی ساختار روش بهتر نسبت به روش های ارزیابی غیرمخرب است. به این صورت که حفظ سلامتی ساختار تلاش دارد تا حس گره های کشف آسیب را گسترش دهد تا این حس گرها بتوانند به صورت دائمی بر روی ساختار نصب شده و سیگنال های دریافتی ثبت نمایند (۵). مهم ترین قسمت سیستم حفظ سلامتی ساختار، پدیده فزیک و وابسته به عیب است که به وسیله حس گر اندازه گیری می شود.

اصل الکترومکانیکی و کاربرد آن در روش امیدانس الکترومکانیکی

در روش حفظ سلامتی ساختار به منظور حفظ تغییرات در سختی، دمپینگ و کتله ساختار از حس گره های امیدانس بهره گرفته می شود. حس گره های امیدانس، وصله های پیزوالکتریک بوده و معمولاً ابعادی کم تر از $0,25 \times 0,25 \times 0,1$ میلی متر دارند. از این حس گرها به طور مستقیم برای اندازه گیری پاسخ دینامیکی ساختار استفاده می گردد.

مبدل های پیزوالکتریک که در حالت مستقیم عمل می کنند، هنگامی که به صورت میخانیکی تحت استرس قرار می گیرند یک چارج برقی تولید نموده و در حالت معکوس زمانی که یک میدان برقی اعمال می گردد، یک استرین مکانیکی ایجاد می کنند. در روش حفظ سلامتی ساختار براساس امیدانس الکترومکانیکی برای حصول نمودار امیدانس از اثر مستقیم و معکوس مواد پیزوالکتریک به طور هم زمان استفاده می شود. به این صورت که زمانی که یک تکه پیزوالکتریک به یک ساختار

متصل می‌گردد و با یک میدان برقی متناوب و ثابت تحریک می‌شود، یک تغییر شکل کوچک در وصله پیزوالکتریک و ساختار متصل به آن ایجاد می‌گردد.

از آن جایی که فریکونسی تحریک بسیار بالاست (۶، ۷)، پاسخ دینامیکی ساختار تنها نواحی بسیار موضعی حس‌گر را بازتاب می‌کند. پاسخ آن نواحی موضعی به ارتعاشات مکانیکی، به شکل یک پاسخ برقی به حس‌گر پیزوالکتریک باز می‌گردد. زمانی که یک عیب یا آسیب موجب تغییر در پاسخ دینامیکی ساختار شود، در پاسخ برقی پیزوالکتریک آشکار می‌شود. این تغییر شامل شیف‌ت فریکونسی و یا تغییر دامنه در پاسخ دینامیکی ساختار می‌باشد.

تکنیک حفظ سلامتی ساختار به روش امیدانس با بهره‌گیری از خواص کوپلینگ الکترومکانیکی مواد پیزوالکتریک توسعه یافته و یک روش ارزیابی غیرمخرب جدید را عرضه داشته است. مفهوم اساسی این رویکرد، حفظ تغییرات در امیدانس مکانیکی ساختار می‌باشد که به واسطه حضور عیب و آسیب در ساختار حاصل می‌گردد. از آن جایی که اندازه‌گیری امیدانس مکانیکی ساختار مشکل می‌باشد، روش امیدانس از اندازه‌گیری امیدانس برقی مواد پیزوالکتریک سود می‌برد. این امیدانس برقی به‌طور مستقیم با امیدانس مکانیکی ساختار میزبان مرتبط بوده و از حضور عیب در ساختار تأثیر می‌پذیرد. از طریق حفظ امیدانس برقی اندازه‌گیری شده و مقایسه آن با حالت بدون عیب می‌توان به‌صورت کیفی تعیین نماید که عیب در ساختار ایجاد شده و یا وقوع آن حتمی است.

به‌منظور اطمینان از حساسیت بالای روش برای آسیب‌ها در مراحل ابتدایی تشکیل، امیدانس برقی در فریکونسی‌های بالا (در حد kHz) اندازه‌گیری می‌گردد. در چنین فریکونسی‌هایی طول موج تحریک کوچک بوده و به مقدار کافی برای حفظ تغییرات کوچک در پیوستگی ساختار حساس می‌باشد. مهم‌تر این که سیگنال‌های فریکونسی بالا نیاز به ولتاژ خیلی کمی دارند تا بتوانند یک تحریک امیدانس مفید را در ساختار میزبان ایجاد نمایند.

روش امیدانس که از مواد هوشمند سود می‌برد (۸)، برای دامنه وسیعی از کاربردهای حفظ سلامتی ساختار مناسب می‌باشد.

مدل‌سازی روش امیدانس الکترومکانیکی بر روی تیر در حالت بدون عیب و با عیب

۱. میدان تغییر موقعیت و استرین پیزوالکتریک

میدان جابجایی میخانیکی ساختار، به‌صورت رابطه (۱) نمایش داده می‌شود.

$$u(x,t) = -zw'(x,t)$$

$$v(x,t) = 0$$

$$w(x,t) = w(x,t)$$

(۱)

که در آن u و v و w به ترتیب تغییر موقعیت در جهت x و y و z می باشد. در نتیجه می توان مقدار استرین را به صورت رابطه (۲) بیان کرد (۲).

$$\epsilon_{22} = -ZW(x,t) \quad \epsilon_{12} = \epsilon_{22} = \epsilon_{33} = \epsilon_{13} = \epsilon_{23} = 0 \quad (2)$$

۲. مقدار استرس و تغییر موقعیت برقی

این مقدار به طور کلی با رابطه (۳) بیان می شود (۹)

$$\epsilon = s^E \sigma + d^T E \quad (3)$$

$$D = d\sigma + e^{\sigma} E$$

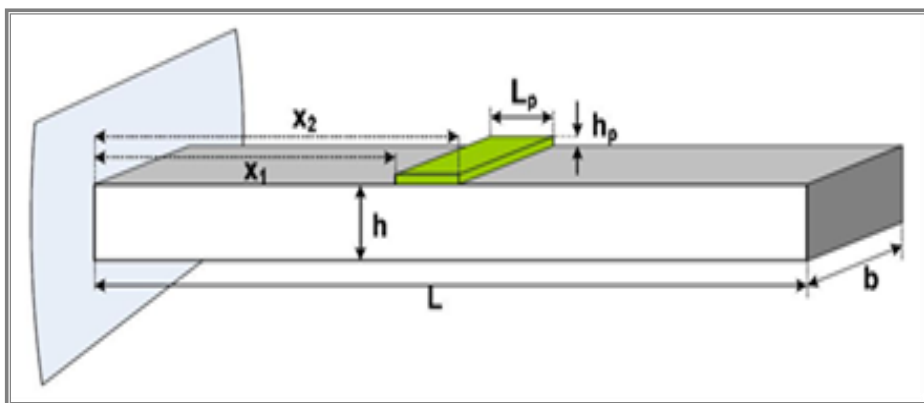
که در این روابط، ϵ کرنش، σ تنش، s^E مدول تسلیم پیزوالکتریک در یک میدان برقی صفر، d^T ثابت پیزوالکتریک در تنش صفر، E میدان برقی، D تغییر موقعیت برقی، d ثابت پیزوالکتریک، e^{σ} ثابت دی الکتریک می باشند. روابط ارایه شده اخیر را برای یک تیر پیزوالکتریک می توان به صورت رابطه (۴) بیان کرد:

$$\sigma_1 = c\epsilon_1 + dE_3$$

$$D_3 = d\epsilon_1 + eE_3 \quad (4)$$

۳. انرژی حرکتی و ذخیره انرژی تیر و پیزوالکتریک

شکل ۱ به صورت نمادینه یک تیر یک سر بسته را با وصله پیزوالکتریک نشان می دهد. با محاسبه انرژی ذخیره و حرکتی برای تیر و پیزوالکتریک می توان انرژی ذخیره و حرکتی را برای کل سیستم



شکل ۱: تیر یک سر بسته به همراه پیزوالکتریک (۹)

۴. انرژی حرکتی و ذخیره‌ی تیر یک سر بسته

با استفاده از تئوری اویلر برنولی برای ارتعاشات تیر، انرژی حرکتی برابر است با:

$$T_b = \frac{1}{2} \int_0^L \rho A \dot{W}^2(x, t) dx \quad (5)$$

در این رابطه T_b انرژی حرکتی تیر، ρ کثافت تیر، A سطح مقطع تیر و L طول تیر می‌باشد انرژی ذخیره‌ی تیر برابر است با:

$$U_b = \frac{1}{2} \int_V \sigma_{11} \varepsilon_{11} Dv \quad (6)$$

که در آن σ_{11} و ε_{11} به ترتیب نشان‌دهنده استرس و استرین می‌باشند.

۵. انرژی حرکتی و ذخیره‌ی تیر پیزوالکتریک

انرژی حرکتی سیستم پیزوالکتریک با رابطه (۷) بیان می‌شود:

$$T_p = \frac{1}{2} \int_{x_1}^{x_2} \rho_p A_p \dot{w}^2(x, t) dx \quad (7)$$

در این رابطه ρ_p کثافت پیزو، A_p سطح مقطع پیزو، x_1 فاصله ابتدایی پیزوالکتریک از محور x و x_2 فاصله انتهایی پیزوالکتریک از محور x می‌باشد.

انرژی ذخیره‌ی برای یک سیستم پیزوالکتریک به صورت زیر می‌باشد:

$$U_p = \frac{1}{2} \int_V (\sigma_1 \varepsilon_1 - D_3 E_3) dV \quad (8)$$

۶. انرژی حرکتی و ذخیره‌ی کل سیستم

انرژی حرکتی و ذخیره‌ی کل سیستم با رابطه (۹) بیان می‌شود:

$$T = T_b + T_p \quad (9)$$

$$U = U_b + U_p$$

۷. معادلات کلی سیستم

معادله کلی سیستم را می‌توان نوشت:

$$Mq(t) + Kq(t) = NE_3 \quad (10)$$

که در این رابطه M متریکس کتلوی سیستم K ماتریس سختی سیستم و N وکتور مومنتم ایجاد شده توسط عمل‌گر پیزوالکتریک می‌باشد و در صورتی که در ساختار عیبی ایجاد شود، در متکریس سختی و کتلوی سیستم تاثیر دارد.

۸. بار برقی چارج شده بر روی پیزوالکتریک

بار برقی چارج شده بر روی پیزوالکتریک به صورت رابطه (۱۱) بیان می‌گردد (۱۰):

$$I(t) = i\omega(-db \left(\frac{h}{2}\right) \phi(x) \Big|_{x_1}^{x_2} T(-M^* \omega + C^* i\omega + k^*)^{-1} N^* + \frac{ebpl_p}{h_p}) V_0 e^{i\omega t} \quad (11)$$

$$M^* = T^T K T \text{ و } K^* = T^T K T^* \quad C^* = \alpha M^* + \beta K$$

که در آن α و β ثوابت دمپینگ هستند.

۹. امپدانس برقی پیزوالکتریک

با توجه به این که امپدانس برقی نسبت ولتاژ به جریان می‌باشد، خواهیم داشت (۱۳):

$$Z(i\omega) = \frac{V_3(t)}{I(t)} = \left[i\omega(-db \left(\frac{h}{2}\right) \phi(x) \Big|_{x_1}^{x_2} T(-M^* \omega + C^* i\omega + k^*)^{-1} N^* + \frac{ebpl_p}{h_p} V_0 e^{i\omega t} \right]^{-1} \quad (12)$$

پیاده سازی مودل ارزیابی شده برای یک تیر یک سر بسته در حالت بدون عیب و با عیب

برای بررسی تئوری حفظ سلامتی ساختار (۱۱، ۱۲) به روش امپدانس برای تشخیص عیب در یک تیر یک سر بسته دو عیب با سطح مقطع مربعی با دو اندازه مختلف و در یک مکان بر روی یک تیر آلومینیومی ایجاد می‌گردد که مشخصات این عیب در جدول ۱ آورده شده است:

جدول ۱: مشخصات عیوب ایجاد شده در تیر یک سر بسته.

شماره عیب	فاصله مرکز عیب از لبه تیر	ابعاد عیب	علامت نشان دهنده
سالم			Health
۱	13.5 cm	1.5×1.5cm	D1
۲	13.5cm	2×2 cm	D2

جدول ۲: مشخصات و ابعاد تیر یک سر بسته مودل شده.

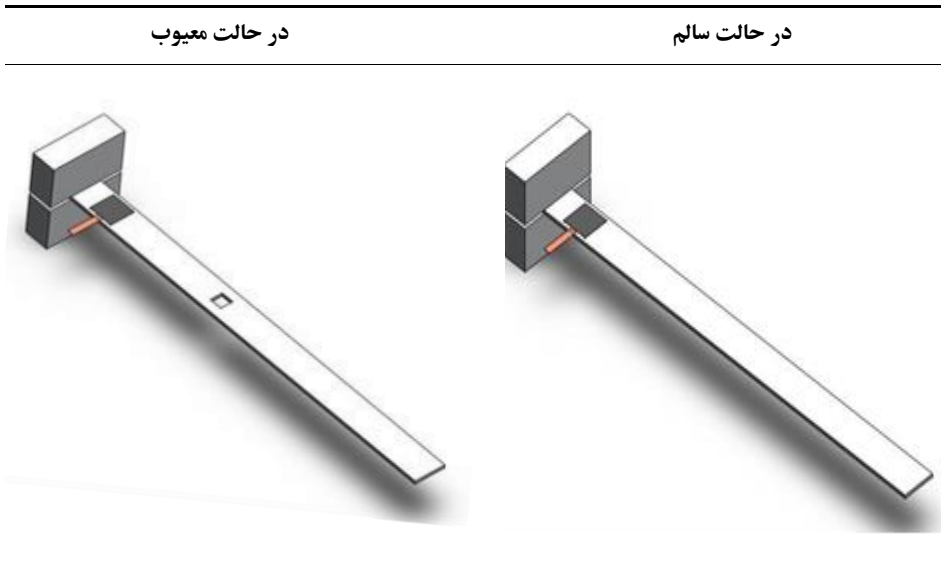
پارامتر	علامت	مقدار	واحد
طول موثر تیر	L	35	Cm
عرض	B	2.5	Cm
ضخامت	H	2	Mm
چگالی	ρ	2700	Kg/m ³
مدول الاستیسیته	E	70	G Pa

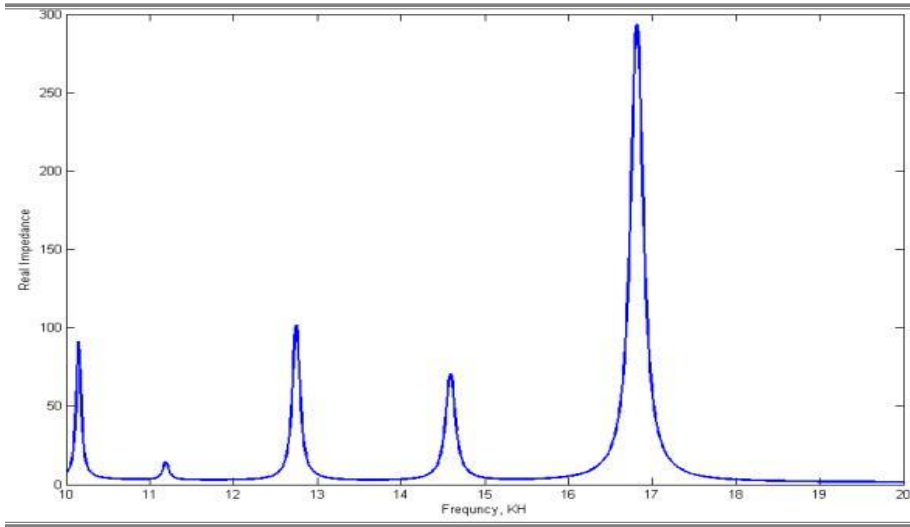
جنس پیزوالکتریک در مودل سازی تئوری *PSI- 5H4E* در نظر گرفته شده و پارامترهای مرتبط در جدول ۳ آمده است:

جدول ۳: مشخصات و ابعاد پیزوالکتریک مودل شده

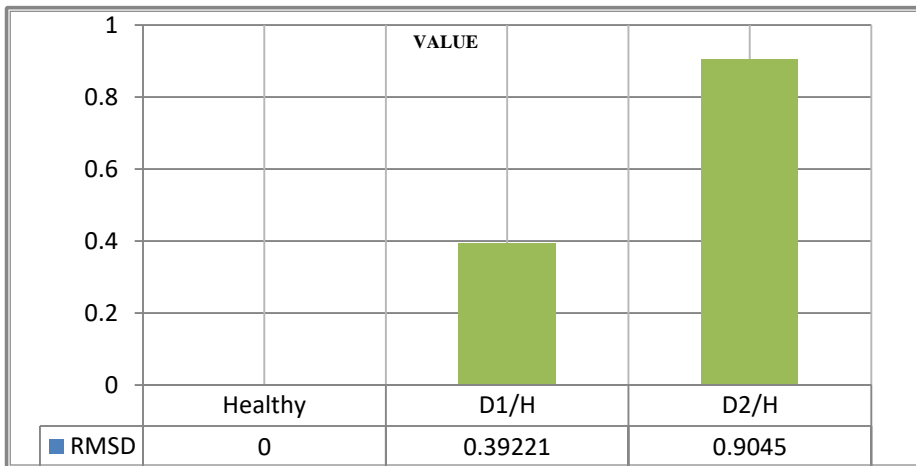
پارامتر	علامت	مقدار	واحد
طول	L_p	2	Cm
عرض	b_p	2	Cm
ضخامت	h_p	0.267	Mm
کثافت	ρ_p	7749.985	Kg/m ³
ضریب تسلیم	S_{11}^E	1.64×10^{-11}	Pa ⁻¹
ضریب استرین	d_{31}	320.026×10^{-12}	m/v
ثابت دی الکتریک	ϵ_{33}^T	$3800\epsilon_0$	F/m
ثابت دی الکتریک در هوا	ϵ_0	8.85×10^{-12}	F/m
فاصله ابتدای پیزوالکتریک از تیر	X_1	1.5	Cm
فاصله انتهای پیزوالکتریک از تیر	X_2	$x_2 = x_1 + L\theta$	Cm

جدول ۴: وضعیت تیر یک سر بسته در حالت سالم و با عیب





شکل ۲: شکل امپدانس های ایجاد شده در مدل سازی و مقادیر *RMSD*



شکل ۳: بررسی وضعیت تیر یک سر بسته در حالت سالم در مقادیر *RMSD*

آزمایش تجربی

از ترکیبی شامل اسید هیدروکلریک، اسید نیتریک و اسید سولفوریک برای تحمیل خوردگی استفاده گردید. اسید هیدروکلریک (HCL) جهت شبیه سازی سریع آسیب خوردگی حفره ای بین دانه ای که یک ساختار المونیمی ممکن است در چندین سال تجربه کند استفاده می شود. دلایل

استفاده از HCL برای خوردن ساختار در قسمت پایین جدول ۶ آمده است. از اسید سولفوریک برای نزدیک ساختن محیط خوردنده به محیطی که یک ساختار در مجاورت گاز ترش (H_2S) تجربه می‌کند استفاده می‌گردد. در ضمن این ترکیب با نرخ بسیار بالاتری نسبت به اسید هیدروکلریک منجر به عیوب سطحی در ساختار می‌گردد. با توجه به اینکه المونیوم در یک محیط صنعتی در یک نرخ تقریبی سال/میکرون ۰/۸۱ سوراخ می‌گردد. بنابراین، سعی گردید نرخ خوردگی با مواد بیان شده تسریع گردد.

جدول ۶: محلول مورد استفاده برای ایجاد خوردگی

HNO_3 46%%	HCL 42%%	H_2SO_4 12%%
--------------	----------	----------------



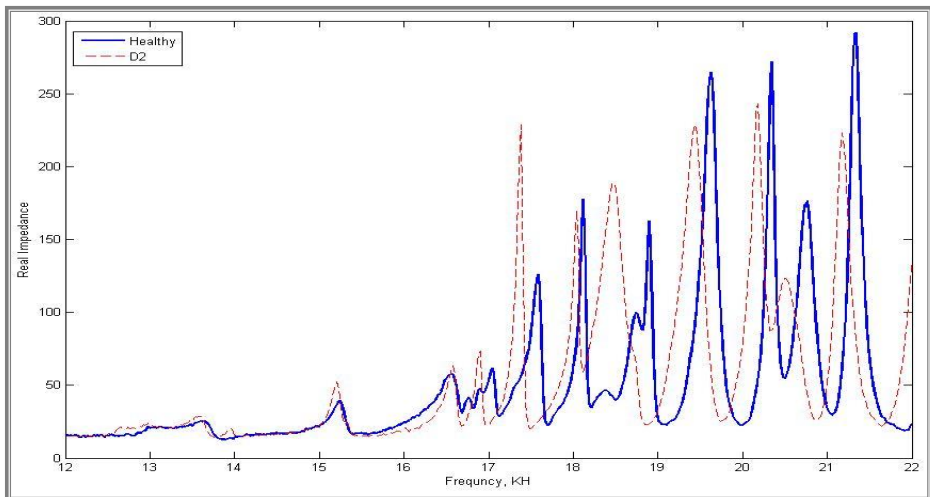
شکل ۴: شکل تیر به همراه پیزوالکتریک و مکان عیب‌های ایجاد شده

تحلیل و مناقشه

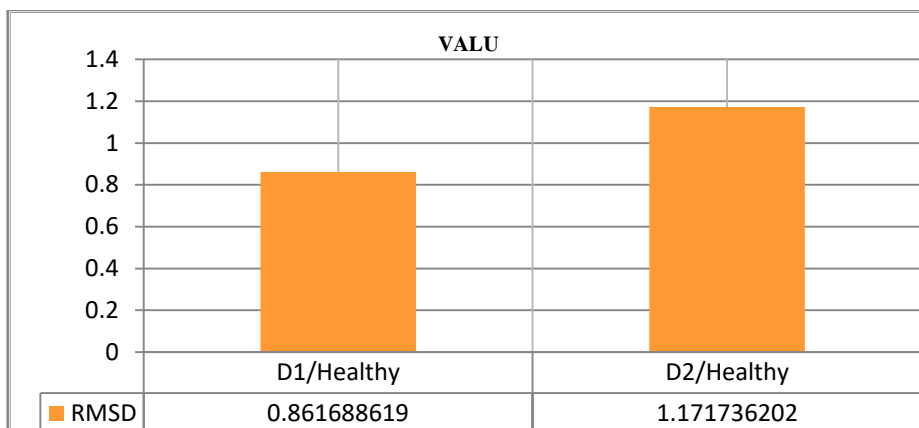
جهت اعتبار بخشی به نتایج تحلیلی، آزمایش‌های حفظ سلامتی ساختار به روش امپدانس بر روی یک تیر از جنس آلایژ المونیوم ۱۰۶۰ و در شرایط مرزی یک سر بسته انجام شد. ابعاد نمونه‌ها $2 \times 30 \times 350$ میلی متر بودند. جنس دو پیزوالکتریک مورد استفاده از جنس PSH_5H4E و ابعاد حس گر پیزوالکتریک $20 \times 20 \times 0.267$ میلی متر بود. محدوده فریکونسی مورد نظر که در برگزیده بیشترین تعداد پیک بود. محدوده فریکونسی ۱۲ تا ۲۲ کیلو هرتز انتخاب شد و در حالت یک سر بسته تیر از سمت پیزوالکتریک بسته بندی شده است. در مورد عیب‌ها در شرایط آزمایشگاهی، تقریباً شرایط مدل سازی رعایت شده است، با این تفاوت که برای افزایش سطح خوردگی، عمق عیب‌ها افزایش یافته است، به این صورت که عمق خوردگی از ۰,۲ به ۰,۴ افزایش داده شده است.

جدول ۷: مشخصات عیب‌های ایجاد شده در آزمایش.

شماره	عمق متوسط خوردگی mm	علامت نشان دهنده
۱	-	Healthy
۲	0.2	D2
۳	0.4	D4



شکل ۵: شکل امپدانس‌های ایجاد شده در شرایط آزمایشگاهی و مقادیر RMSD



شکل ۶: بررسی وضعیت تیر بک سر بسته در حالت سالم در مقادیر *RMSD*

با توجه به نمودارهای به دست آمده در بحث تحلیلی و آزمایش‌گاهی می‌توان به وضوح دید که پیزوالکتریک در هر دو بحث قادر به تشخیص ابعاد عیب‌ها می‌باشد، به طوری که هرچه ابعاد عیب‌ها بیشتر می‌شد، مقدار پیک‌های بیشتری از لحاظ میانگین مقدار معیار *RMSD* نسبت به حالت سالم تیر از خود نشان می‌دهد.

نتیجه‌گیری

طوری‌که از بررسی‌های تحلیلی بر می‌آید، معیار *RMSD* به خوبی نشان‌داد که هر چه عیب دارای ابعاد بزرگ‌تری داشته باشد، مقدار معیار *RMS* آن بیشتر می‌شود. در بخش آزمایش‌گاهی نیز به همین گونه بود، به این ترتیب که مقدار معیار *RMSD* عیب خوردگی دوم که عمق بیشتری نسبت به عیب خوردگی اول را شامل می‌شد، دارای افزایش ۲۶،۴۶٪ بوده است.

مقدار تفاوت میزان افزایش مقدار معیار *RMSD* در بخش آزمایش‌گاهی ۲۶،۴۶٪ و در بخش تحلیلی تقریباً ۵۶،۶۳٪ بود که این مقدار تفاوت را می‌توان ناشی از عواملی مانند یک‌سان نبودن ابعاد در بخش آزمایش‌گاهی و مدل تحلیلی و ایجاد شرایط گیره‌بندی تیر برای ایجاد تیر بک سر بسته دانست.

منابع

- (1) Sun, F., Chaudhry, Z., Liang, C., and Rogers, C.A. "Truss Structure Integrity Identification Using PZT Sensor-Actuator," *Journal of Intelligent Material Systems and Structure*. 1995; V.6, PP 134-139
- (2) Giurgiutiu, V. "Structural Health Monitoring with Piezoelectric Wafer Active Sensors", Academic Press, Burlington, MA. 2008.
- (3) Simmers Jr., G.E. "Impedance-based structural health monitoring to detect corrosion", Meter's Thesis, Center for Intelligent Material Systems and Structures, Virginia Polytechnic Institute and State University. 2005.
- (4) Liang, C., Sun, F. P., and Rogers, C.A. "Coupled Electromechanical Analysis of Adaptive Material System–Determination of Actuator Power Consumption and System Energy Transfer," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 1998; V.5, pp 20-21.
- (5) Park, G., Sohn, H., Farrar, C., Inman, D. "Overview of Piezoelectric Impedance-Based Health Monitoring and Path Forward," *Shock and Vibration Digest*. November 2003; Vol. 35, No. 6, pp 451-463.
- (6) Odegard GM, Gates TS, Nicholson LM, Wise KE. Equivalent continuum modeling of Nano-structured materials. *Compos Sci Technol*. 2002; 62, pp 1869-80.
- (7) Liu YJ, Chen XL. Evaluations of the effective material properties of carbon nanotube-based composites using a nanoscale representative volume element. *Mech Mater*. 2003; 35: pp 69–81.
- (8) Odegard GM, Gates TS, Wise KE, Park C, Siochi EJ. Constitutive modeling of nanotube-reinforced polymer composites. *Compos. Sci Technol*. 2003; 63: 1671-87.
- (9) Odegard GM, Pipes RB, Hubert P. Comparison of two models of SWCN polymer composites. *Compos Sci Technol*. 2004; 64: 1011-20
- (10) Tserpes KI, Papnikos P. Finite element modelling of single-walled carbon nanotubes. *Composites: Part B*. 2005; 36: 468-77.
- (11) Buryachenko VA, Roy A. Effective elastic moduli of nanocomposites with prescribed random orientation of nanofibers. *Composites: Part B*. 2005; 36: 405-16.
- (12) Xiao JR, Gama BA, Gillespie Jr JW. An analytical molecular structural mechanics model for the mechanical properties of carbon nanotubes. *Int J Solids Struct*. 2005; 42: 3075-92.