



تحلیل حساسیت کرنش و ولتاژ پیش‌بینی شده در برداشت‌کننده انرژی با آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی به روش PAWN

مجتبی عفت‌پناه حساری¹، محمدامین عسکری فرسنگی²، حسن صیادی^{3*}

1- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

2- فارغ التحصیل دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

3- استاده، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

* تهران، صندوق پستی 11155-9567، sayyaadi@sharif.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 01 آبان 1396

پذیرش: 27 آذر 1396

ارائه در سایت: 22 دی 1396

کلید واژگان:

آلیاژ حافظه دار مغناطیسی

برداشت‌کننده انرژی

سازه کوپل با آلیاژ

تحلیل حساسیت کلی

شاخص حساسیت

چکیده

در این مقاله تحلیل حساسیت کلی کرنش پیش‌بینی شده به وسیله مدل برداشت‌کننده انرژی از ارتعاشات با آلیاژ حافظه دار مغناطیسی ارائه شده است. در مدل انتخاب شده، قطعه‌های آلیاژ به یک تیر دو سر درگیر متصل شده‌اند و سیم پیچ به دور آن‌ها پیچیده شده است. بار ضربه‌ای به جرم محک متصل در وسط تیر اعمال می‌شود. ارتعاشات حاصل از این ضربه باعث ایجاد کرنش در تیر و آلیاژ می‌گردد. به منظور برداشت انرژی از تیر، با محدودیت‌هایی مواجه هستیم که یکی از آن‌ها کرنش ایجاد شده در آلیاژ می‌باشد. با زیاد شدن کرنش با توجه به پیش‌کرنش اعمال شده، آلیاژ از حالت فشاری خارج می‌گردد و باعث عدم کارایی مدل می‌گردد. همچنین زیاد شدن این کرنش از حد مجاز نتایج پیش‌بینی شده را تحت تاثیر قرار می‌دهد. بدین ترتیب روش PAWN به عنوان یک روش کارآمد و آسان برای تحلیل حساسیت کلی مدل نسبت به ورودی‌ها معرفی می‌گردد. سپس مدل در نظر گرفته شده با روش معرفی شده، تحلیل می‌شود و اثر هر یک از ورودی‌ها بر خروجی مدل معرفی می‌گردد. در ادامه با توجه به اهمیت ولتاژ برداشت شده، تحلیل حساسیت و رتبه‌بندی پارامترها انجام می‌گردد. همچنین با استفاده از آزمون دو-نمونه‌ای کولموگوروف-اسمیرنوف نشان داده شد که در طراحی برداشت‌کننده و بهینه‌سازی آن با توجه به کرنش می‌توان طول، ضخامت و عرض آلیاژ و با توجه به ولتاژ می‌توان ارتفاع تیر را در محدوده ماکزیمم و مینیمم بررسی شده و با معیار مورد نظر، ثابت در نظر گرفت.

Global sensitivity analysis of predicted strain and voltage from magnetic shape memory alloy based energy harvester using PAWN method

Mojtaba Effatpanah Hesari, Mohammad Amin Askari Farsangi, Hassan Sayyaadi*

School of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

* P.O.B.11155-9567, Tehran, Iran, sayyaadi@sharif.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 23 October 2017
Accepted 18 December 2017
Available Online 12 January 2018

Keywords:

Magnetic shape memory alloy
Energy harvester
Beam coupled with MSMA
Global sensitivity analysis
Sensitivity index

ABSTRACT

In this paper, Global sensitivity analysis of predicted strain from clamped-clamped beam magnetic shape memory alloy based energy harvester with PAWN method is presented. In the selected model MSMA units attached to the roots of clamped-clamped beam while coil wrapped around MSMA. A shock load is applied to a proof mass in the middle of the beam. As a result of beam vibration a longitudinal strain is produced in the MSMA and beam. There are limits to harvest energy from this model and one of them is the strain applied to the MSMA. As the strain increases with respect to the applied pre-strain, the MSMA exits the compression region and causes the model to fail. When strain exceeds limits also affect the predicted result. Thus PAWN method as an efficient and easy way for global sensitivity analysis of the inputs has been taken into account. Then the model is analyzed with introduced method to determine the effect of each input on the output. In the following, due to the importance of the harvested voltage, the sensitivity analysis and ranking of inputs are performed. Moreover, using two-sample Kolmogorov-Smirnov test it is shown that for design and optimization of model with respect to strain one can fix thickness, width and length of MSMA while studying model in corresponding maximums and minimums and also with respect to RMS voltage and similar test the width of the beam can be fixed.

1- مقدمه

تمامی این اجزا نیاز به توان کافی برای عملکرد صحیح دارند بنابراین به‌طور کلی سیستم‌های سنجش از راه دور شامل سنسورها، مدارهای الکترونیکی تصحیح/بهبود سیگنال و فرستنده‌ها هستند [1].

منبع تأمین توان مسئله مهمی است که باید به آن توجه شود. یکی از منابع مرسوم برای تأمین توان لازم، استفاده از باتری‌هاست. عمر محدود باتری‌ها و

Please cite this article using:

M. Effatpanah Hesari, M. A. Askari Farsangi, H. Sayyaadi, Global sensitivity analysis of predicted strain and voltage from magnetic shape memory alloy based energy harvester using PAWN method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 18, No. 01, pp. 317-326, 2018 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

است ابعاد قطعه در فرایند ساخت با مقدار طراحی شده متفاوت باشد.

- عدم قطعیت مدل: عدم قطعیت ناشی از دقیق نبودن مدل ریاضی برای پیش‌بینی خروجی در مقایسه با شرایط حقیقی که منشأ آن نبود دانش کافی است. برای مثال در مدل ساده سقوط آزاد، اصطکاک با هوا در نظر گرفته نمی‌شود.

- عدم قطعیت محاسبات: عدم قطعیت ناشی از خطاهای عددی و تقریب‌ها در اجرای مدل ریاضی. برای مثال تقریب‌هایی که در حل معادلات دیفرانسیل پاره‌ای در مدل‌های پیچیده استفاده می‌شود.

در این مقاله، ابتدا مروری بر کارهای انجام شده در زمینه تحلیل حساسیت برداشت‌کننده انرژی و برداشت انرژی از محیط با آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی انجام می‌شود. سپس مدل برداشت‌کننده انرژی موردنظر معرفی می‌گردد. در قسمت بعد روش آنالیز حساسیت به‌کار رفته، توضیح داده می‌شود. سپس آنالیز حساسیت مدل نسبت به پارامترهای ورودی انجام می‌گردد. با توجه به اهمیت ولتاژ خروجی در برداشت‌کننده‌های انرژی، نتایج تحلیل حساسیت ورودی‌ها بر ولتاژ خروجی نیز ارائه می‌گردد.

2- مرور بر کارهای انجام‌شده در زمینه‌ی تحلیل حساسیت برداشت

کننده انرژی

با تحلیل حساسیت مدل می‌توان اثر هر یک از ورودی‌ها را بر خروجی مشخص نمود. عبدالکفی و همکاران [5] با در نظر گرفتن یک مدل برداشت‌کننده انرژی پیزوالکتریکی و روش گسترش آشوب چندجمله‌ای، تجزیه و تحلیل حساسیت اثر مقاومت بار، فاصله بین مرکز جرم و محور الاستیک و ضرایب فنرهای غیرخطی استفاده شده در سیستم را بررسی کردند. بن‌عاید و همکاران [6] اثر تغییر شکل را بر روی تیر یکسر گیردار به‌عنوان برداشت‌کننده انرژی پیزوالکتریکی بررسی کردند و اثر مقاومت الکتریکی و پارامترهای هندسی را بر عملکرد سیستم بررسی نمودند.

ژیمیاو یان و همکاران [7] انرژی برداشت شده از ارتعاشات یک بلاف بادی² دارای سطح مقطع مثلثی با استفاده از پیزوالکتریک را مورد بررسی قرار دادند و با آنالیز خطی اثر مقاومت الکتریکی و سرعت باد را بررسی نمودند.

3- مرور بر کارهای انجام‌شده در زمینه برداشت انرژی از آلیاژهای

مغناطیسی

در برداشت انرژی از آلیاژهای حافظه‌دار مغناطیسی، با ایجاد کرنش در این ماده، میدان مغناطیسی اطراف آن تغییر می‌کند. با استفاده از یک سیم‌پیچ و با توجه به قانون القای فارادی می‌توان از تغییرات میدان مغناطیسی، انرژی الکتریکی برداشت نمود. از مزیت‌های این آلیاژ در مقایسه با مواد دیگر می‌توان به طول عمر بالا، قابلیت استفاده در فرکانس‌های پایین، امکان اعمال تحریک با دامنه بالا و عدم محدودیت به کارکرد در شرایط تشدید اشاره نمود. همچنین نیاز به سیم‌پیچ و میدان مغناطیسی بایاس و کارکرد در شرایط دمایی مشخص از محدودیت‌های این روش هستند [8].

در سال 2007، کارامان [9] و همکاران با انجام آزمایش برای برداشت انرژی به‌وسیله آلیاژ حافظه‌دار تحت بار سیکنی با فرکانس 1 تا 5 هرتز اثرات دامنه کرنش و فرکانس را بر ماکزیمم ولتاژ و توان گزارش کردند. در سال 2008، ساروایت و داپینو [10] با در نظر گرفتن اثرات دینامیکی، مدلی از یک قطعه آلیاژ حافظه‌دار ارائه نمودند. آن‌ها نشان دادند که با افزایش فرکانس،

در نتیجه اجبار بر تعویض، باعث شده تا حد امکان از آن‌ها استفاده نشود. با توسعه مدارهای الکترونیکی استفاده از سیستم‌های انتقال بی‌سیم که توان مصرفی پایینی دارند، گسترش یافت. برای مثال یک شبکه حسگر بی‌سیم که شامل سنسورها، فرستنده و ... با دوره کاری کم می‌باشد، مصرفی کمتر از 100 میکرووات دارد [2]. بدین ترتیب لزوم تأمین انرژی این ادوات توجه زیادی را به انرژی ارتعاشات به‌عنوان یک منبع مناسب برای تأمین انرژی معطوف کرده است [3].

انرژی ارتعاشی را می‌توان با موادی از جمله پیزوالکتریک، الکترومگنتیک، الکترواستاتیک، مگنتواسترکتیو، مگنتوالکتریک، پلیمرهای الکترواکتیو از جمله الاستومردیالکتریک و در نهایت آلیاژهای حافظه‌دار مغناطیسی به انرژی الکتریکی تبدیل کرد [4]. در این تحقیق از تیر دوسرگیردار در حالت کوپل با آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی، به‌عنوان مدل برداشت‌کننده انرژی از ارتعاشات استفاده شده است. به‌علت ماهیت گوناگون نیروهای موجود در طبیعت، نیروی اعمالی به سازه می‌تواند به روش‌های متعددی از جمله بار ضربه‌ای وارد شود. ضربه‌ی اعمالی به پاشنه‌ی پا در هنگام راه رفتن، افتادن قطرات آب بر روی یک سطح و عبور ماشین از روی سرعت‌گیر از جمله مواردیست که می‌توان بار اعمالی را به صورت ضربه مدل نمود. با توجه به آن‌که پاسخ سیستم به بار ضربه‌ای در مواردی با پاسخ آن به دیگر انواع نیروها تفاوت دارد، لذا بررسی تحلیل بارضربه‌ای حائز اهمیت می‌باشد. اگرچه تیر طره در برداشت‌کننده‌های انرژی مورد مطالعه بیشتری قرار گرفته، ولی برداشت‌کننده‌های دو سر درگیر دارای مزایایی نسبی بوده که بررسی آنان را مهم می‌کند. یکی از این موارد غیرخطی کردن سیستم برداشت‌کننده در تیر دوسر درگیر بوده که موجب افزایش باند فرکانسی و در نتیجه افزایش انرژی برداشتی از مجموعه می‌شود. از موارد دیگر آن‌که به‌دلیل وجود دو تکیه‌گاه در دو انتهای تیر، آلیاژهای نصب شده کرنش بیشتری را تجربه می‌کنند و در نتیجه انرژی برداشتی از ارتعاشات افزایش می‌یابد. همچنین در تیر دو سر درگیر به‌دلیل بالاتر بودن فرکانس طبیعی، در هنگام اعمال بار ضربه‌ای نوسانات و در نتیجه تغییرات شار سریع‌تر خواهد داشت. از چالش‌های مدل‌سازی که در دهه‌های اخیر به آن توجه زیادی شده است، تعداد زیاد متغیر تصادفی است که در پارامترهای ورودی و ثابت سیستم وجود دارد. به‌عنوان مثال، مشخصات مدل از تعدادی پارامتر که دارای ماهیت تصادفی می‌باشند مانند هندسه، محل اثر بار و ... تأثیر می‌پذیرد. اثر عدم قطعیت‌های متغیرهای ورودی روی پاسخ مدل با استفاده از تحلیل حساسیت بررسی می‌شود. بدین ترتیب اهمیت هر یک از پارامترهای ورودی و تأثیر آن‌ها روی خروجی تعیین می‌گردد.

تحلیل حساسیت کلی¹ مجموعه‌ای از تکنیک‌های ریاضی باهدف بررسی انتشار عدم قطعیت در یک مدل عددی است. تحلیل حساسیت کلی را می‌توان به‌طور خاص درک نسبی سهم منابع مختلف عدم قطعیت در تغییرات خروجی مدل تعریف کرد. برخی از منابع عدم قطعیت در خروجی مدل عبارتند از:

- عدم قطعیت در پارامترهای ثابت: عدم قطعیت در پارامترهای ثابتی که به مدل وارد می‌شوند و مقدار دقیق آن‌ها مشخص نیستند یا قابل کنترل نمی‌باشند. برای مثال تغییرات خواص مواد در یک تحلیل المان محدود، یا شتاب محلی گرانج زمین

- تغییرپذیری پارامترها: عدم قطعیت ناشی از تغییر در پارامترهای ورودی مدل که منشأ آن تله‌رانسها و ... می‌باشد. برای مثال ممکن

² Bluff body

¹ Global sensitivity analysis (GSA)

آلیاژ ایجاد می‌گردد. با تغییر کرنش در آلیاژ، شار مغناطیسی داخل سیم‌پیچ تغییر کرده و این تغییر شار با وجود میدان بایاس در جهت عرضی باعث تولید ولتاژ AC در سیم‌پیچ‌های بالا و پایین می‌گردد. به‌منظور جلوگیری از بازگشت شار از سیم‌پیچ فرض شده است که سیم‌ها از داخل شیاری که در نزدیکی سطح تیر ایجاد شده، عبور کرده‌اند به‌طوری که سطح مقطع سیم‌پیچ تا حد امکان به سطح مقطع آلیاژ نزدیک باشد. برای جلوگیری از ایجاد نیروهای کششی در آلیاژ، در میدان بایاس صفر آلیاژ تحت بارگذاری اولیه قرار می‌گیرد. بدین ترتیب پیش‌کرنش‌هایی به مقدار دلخواه در آن ایجاد می‌گردد [15].

کرنش کششی ایجاد شده در تیر دو سر درگیر در هنگام ارتعاش موجب غیرخطی شدن سفتی تیر و در نتیجه افزایش پهنای باند فرکانسی می‌شود.

در مرجع [15] برای به‌دست آوردن معادلات حاکم بر سازه از اصل همیلتون استفاده شده است. با در نظر گرفتن شکل بار خارجی اعمالی به سازه به‌صورت یک پالس مستطیلی و با جایگذاری ترم‌های مجازی در معادله همیلتون به معادله زیر برحسب جابجایی عرضی خواهیم رسید:

$$M\ddot{q}_w + K_1 q_w + K_3 q_w^3 + K_5 q_w^5 = \bar{K}_0 + \bar{K}_1 q_w + \bar{K}_3 q_w^3 + \bar{F} \quad (1)$$

در این معادله M ، K_i ها، \bar{K}_i ها و \bar{F} ثوابتی هستند که با محاسبه انتگرال‌هایی که در مرجع [15] ارائه شده است، به‌دست می‌آیند. این معادله با معادلات جهت‌گیری مجدد مارتنزیت کوپل می‌باشد.

$$\begin{aligned} \pi^\xi = & \sigma \varepsilon^{r, \max} + \frac{1}{2} \Delta S \sigma^2 - \mu_0 M^{\text{sat}} H_x^{\text{eff}} (\cos \theta_3 + \sin \theta_4) \\ & + \mu_0 M^{\text{sat}} H_z^{\text{eff}} (\cos \theta_4 - \sin \theta_3) \\ & + \rho K_1 (\sin^2 \theta_3 - \sin^2 \theta_4) - \frac{\partial f^\xi(\xi)}{\partial \xi} \end{aligned} \quad (2)$$

π^ξ نیروی محرکه ترمودینامیکی است که با مشتق‌گیری جزئی از تابع انرژی آزاد گیبس برحسب نسبت حجم ورینت مارتنزیت نوع 2 (ξ) به‌دست آمده است. در این معادلات σ تنش اعمالی، $\varepsilon^{r, \max}$ بیشترین کرنش حاصل از جهت‌گیری مجدد ورینت‌ها، ΔS تغییرات تغییرات نرمی آلیاژ، μ_0 ضریب نفوذناپذیری خلا، M^{sat} مغناطش اشباع، θ_i زاویه بین بردار مغناطش و محور آسان بوده و اندیس آن به ناحیه مغناطیسی اشاره می‌کند، H^{eff} میدان داخلی موثر، ρK_1 انرژی ناهمسانگردی مغناطیسی، $f^\xi(\xi)$ تابع سخت‌شوندگی است.

حل این معادلات با توجه به وابستگی اشاره شده و نیاز به حل همزمان آن‌ها با اطلاع از جهت‌گیری مجدد ورینت‌ها، بسیار دشوار است. بدین ترتیب برای رسیدن به جواب، یک روش عددی-تدریجی استفاده شده است. در این روش نیروی خارجی به‌صورت تدریجی اعمال شده و معادله (1) در هر مرحله به‌صورت عددی حل می‌شود. مقدار جدید ξ به‌دست آمده از معادله (2)، مجدداً در معادله (1) با همان بازه‌ی زمانی قرار داده می‌شود. بدین ترتیب در این روش اگر مقدار به‌دست آمده از محاسبه قبلی از حد تعیین شده کمتر باشد، حل به مرحله بعد می‌رود و در غیر این‌صورت محاسبات مرحله فعلی تکرار می‌گردد.

چگالی شار مغناطیسی B تلفیقی از مغناطیس داخلی آلیاژ و میدان اعمالی می‌باشد که با معادله زیر معرفی می‌شود:

$$B = \mu_0 (H^{\text{app}} + M_x) \quad (3)$$

با حل این معادلات می‌توان کرنش‌ها و چگالی شار مغناطیسی را به‌دست آورد و در نهایت با استفاده از قانون القای فارادی، ولتاژ القا شده در سیم‌پیچ با تعداد N حلقه و با سطح مقطع A را یافت.

$$V = -NA \frac{\partial B}{\partial t} \quad (4)$$

پاسخ تنش-کرنش تقریباً ثابت مانده، درحالی که چگالی شار-کرنش با افزایش هیستریزس روبرو شده است. برونو در سال 2011 [11] برداشت انرژی از جهت‌گیری مجدد ورینت‌های مارتنزیت $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{28.5}\text{Ga}_{21.5}$ در حضور میدان مغناطیسی بایاس تحت بار فشاری بررسی کرد. در این مدل‌سازی رفتار آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی به کمک روابط ساختاری پایه ترمودینامیکی در نظر گرفته شده است.

در سال 2013 نلسون و همکاران [12] با محاسبات تئوری و انجام آزمایش‌های تجربی با استفاده از تجهیزات برونو اثرات شرایط مرزی دو سر نمونه آلیاژ را روی ولتاژ برداشتی بررسی کردند. در این آزمایش نشان داده شد که وقتی نمونه به‌صورت دوسرگیردار تحت کرنش قرار گیرد ولتاژ بیشتری نسبت به حالت یکسر درگیر تولید می‌شود.

در سال 2015 سارن [13] آلیاژ را به‌صورت مکانیکی بین فرکانس‌های 130 تا 300 هرتز مورد ارتعاش داد و با ارائه مدل دیگر و بهینه‌سازی توانست توان 69.5mW در فرکانس 195 Hz به‌دست آورد. در سال 2016 عسکری و همکاران [14] با ارائه مدل آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی در حالت کوپل با تیر یکسر درگیر، با اعمال بار ضربه‌ای و اثر پارامترهای مختلف بر میزان ولتاژ خروجی مورد مطالعه قرار دادند.

در سال 2016 صیادی و همکاران [15] با توجه به برداشت بیشتر انرژی از تیر دوسر درگیر، مدل آلیاژ کوپل شده با تیر دوسر درگیر را ارائه نمودند و به بهینه‌سازی پارامترهای هندسی پرداختند.

با توجه به کارهای انجام شده و پیچیدگی مدل‌های به‌کار رفته برای برداشت انرژی از آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی، داشتن دید روشن از تأثیر پارامترها بر خروجی مدل (به‌صورت مجزا) و استفاده از آن در بهینه‌سازی، طراحی آزمایش و تحلیل عدم قطعیت‌ها بشدت موردنیاز است. بدین ترتیب در این مقاله با استفاده از مدل به‌کار رفته در مرجع [15] تحلیل حساسیت و رتبه‌بندی پارامترهای هندسی انجام می‌گردد.

4- معرفی مدل

مدلی که در این پژوهش برای برداشت انرژی با آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی از مرجع [15] انتخاب شده است.

این مدل بخش شامل یک تیر دو سر درگیر تحت بار ضربه‌ای است درحالی که آلیاژ با سیم‌پیچ اطراف آن توسط یک صفحه اتصال‌دهنده با رفتار الاستیک در بالا و پایین روی تیر نصب می‌شوند. در "شکل 1" شماتیک برداشت‌کننده انرژی نشان داده شده است.

تغییر کرنش در آلیاژ در این مدل با اعمال بار ضربه‌ای به وسط تیر صورت می‌گیرد. با ارتعاش تیر در اثر اعمال ضربه، کرنش‌های طولی در تیر و

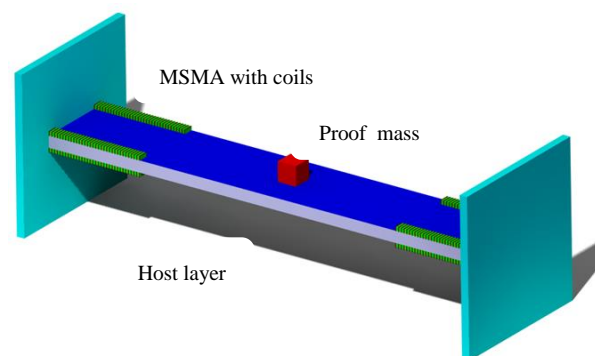


Fig. 1 Schematic representation of energy harvester [15]
شکل 1 شماتیک برداشت‌کننده انرژی [15]

برای اطلاع از جزئیات معادلات می‌توان به مرجع [15] مراجعه کرد.

5- تحلیل حساسیت و شاخص تحلیل حساسیت

در این مقاله مدل عددی را به صورت تابع معادله (1) در نظر می‌گیریم.

$$y = f(X) \quad (5)$$

بردار ورودی‌ها به صورت $X = |x_1, x_2, \dots, x_M| \in X \subseteq R^M$ تعریف

می‌شود. در این تعریف x_i ها دارای مقادیر اسکالر بوده و تابع f نماینده مدل می‌باشد. این تابع می‌تواند صریحاً به صورت معادلات ریاضی ارائه شده باشد یا با حل عددی مدل شبیه‌سازی شده، محاسبه شود. بدین ترتیب y خروجی مدل بوده و به عنوان یک متغیر اسکالر نماینده تمام پیچیدگی‌های مدل می‌باشد. تحلیل حساسیت¹ به بررسی نسبی سهم هر یک از ورودی‌ها (x_i ها) در عدم قطعیت ناشی از تغییرپذیری خروجی مدل (y) می‌پردازد. بدین ترتیب تحلیل حساسیت محلی، عدم قطعیت‌های ناشی از تغییرات ورودی را در اطراف یک نقطه خاص X در نظر می‌گیرد اما تحلیل حساسیت کلی عدم قطعیت‌ها را در کل فضای امکان‌سنجی در نظر می‌گیرد.

در این مقاله بر تحلیل حساسیت کلی تمرکز می‌کنیم. معمولاً در آنالیز تحلیل حساسیت کلی سه هدف خاص دنبال می‌شود که عبارتند از [16]:

اولویت‌بندی عامل‌ها (FP): با هدف رتبه‌بندی ورودی‌های x_i در نظر سهم نسبی آن‌ها در عدم قطعیت خروجی
ثابت کردن عامل‌ها (FF): یا غربالگری با هدف شناسایی ورودی‌هایی که بر عدم قطعیت خروجی تأثیر نمی‌گذارند.

نگاشت عامل‌ها (FM): با هدف تعیین مناطقی در فضای ورودی که خروجی خاصی را تولید می‌کنند.

در تحلیل حساسیت با هدف FP و FF معمولاً از شاخص‌های حساسیت استفاده می‌شود. شاخص حساسیت صفر نشانه عدم تأثیر در خروجی (مناسب برای FF) و شاخص حساسیت بالا نشانه تأثیر زیاد بر خروجی است (مناسب برای FP).

در مراجع ویژگی‌های شاخص حساسیت کلی "خوب" به صورت زیر ارائه شده است [17-19].

- ✓ باید کلی باشد یعنی برای تحلیل حساسیت کلی باید تمام فضای ورودی را شامل شود.
- ✓ باید قابل شمارش باشد یعنی با یک روش تکرارپذیر قابل محاسبه باشد.
- ✓ باید مستقل از مدل باشد یعنی وابسته به تعریف مدل نباشد (چه مدل خطی، غیرخطی یا ... باشد).
- ✓ باید نسبت به هر ورودی بی‌شرط باشد. یعنی مقدار یک یا چند ورودی ثابت در نظر گرفته نشوند.
- ✓ باید تفسیر کردن آن راحت باشد. یعنی بتواند تصویر روشن و واضحی از تأثیر پارامترها بدهد.
- ✓ باید به راحتی قابل محاسبه باشد. یعنی روند به دست آوردن آن پیچیده نباشد.

توضیح این‌که در روش استفاده شده در این مقاله ممکن است این روند به دلیل اجرای زیاد مدل و نیاز به داده‌های زیاد، زمان‌بر باشد اما بازم به راحتی قابل مقایسه است، زیرا بعد از به دست آوردن y ها می‌توان با معادلات جبری ساده شاخص‌های حساسیت را به دست آورد.

- ✓ باید پایدار باشد. یعنی با استفاده از داده‌های نمونه مختلف و شبیه‌سازی آن‌ها نتایج یکسانی ارائه دهد.
- ✓ باید مستقل از زمان‌های مختلف خروجی باشد. یعنی نباید لحظه خاصی از فضای خروجی را در نظر بگیرد تا تحلیل حساسیت را برای مدل در تمامی حالات ارائه دهد.

6- شاخص تحلیل حساسیت PAWN

شاخص‌های حساسیت مبتنی بر تراکم، حساسیت را با برآورد تغییراتی که به واسطه حذف عدم قطعیت یک ورودی یا بیشتر در خروجی ایجاد می‌شود، اندازه‌گیری می‌کنند.

به طوری که حساسیت نسبت به متغیر x_i را با اندازه‌گیری فاصله منحنی توزیع احتمال خروجی در حالت تغییر تمامی ورودی‌ها و حالت ثابت در نظر گرفتن متغیر x_i انجام می‌دهند. در این مقاله از روش جدید PAWN (برگرفته شده از نام ارائه‌دهندگان) [20] برای بهبود استفاده از روش‌های مبتنی بر تراکم استفاده می‌شود. ایده اصلی این روش استفاده از توزیع‌های تجمعی به دلیل راحت بودن تقریب در محاسبه فاصله بین حالت بدون شرط و مشروط (ثابت بودن متغیر x_i) است. بدین ترتیب تکرار محاسبات برای سنجش شاخص در حالات مختلف آسان می‌گردد.

برای محاسبه فاصله بین حالت بدون شرط و مشروط از آمار کولموگروف - اسمیرنوف [21] استفاده می‌کنیم. با استفاده از این روش فاصله بدست آمده بدون توجه به محدوده خروجی y همواره بین 0 و 1 است. همچنین هنگامی که هدف تحلیل حساسیت FF باشد، می‌توان از نتایج آماری آزمون دو-نمونه کولموگروف-اسمیرنوف [22] برای تعیین ورودی‌های غیرموثر با سطح اطمینان مورد نظر استفاده کرد.

در ادامه تابع توزیع تجمعی خروجی y را در حالت بدون شرط با $F_y(y)$ و در حالت مشروط به ثابت در نظر گرفتن ورودی x_i با $F_{y|x_i}(y)$ نشان می‌دهیم. بدین ترتیب $F_{y|x_i}(y)$ نماینده اتفاقاتی است که با حذف تغییرات ورودی x_i می‌افتد و فاصله آن با $F_y(y)$ ، نماینده‌ای از اثر ورودی x_i بر y می‌باشد. "شکل 2" نشان می‌دهد [20]. در "شکل 2" خط چین نشان‌دهنده تابع تجمعی خروجی برای حالت بدون شرط و نمودارهای دیگر نشان‌دهنده حالت ثابت نگه‌داشتن ورودی x_i در سطوح مختلف است. در "شکل 2-الف)" حذف عدم قطعیت‌ها نسبت به ورودی x_i بر y تأثیری ندارد و می‌توان نتیجه گرفت که ورودی x_i بر y تأثیری ندارد. هنگامی که فاصله بین منحنی بدون شرط و منحنی مشروط افزایش می‌یابد تأثیر ورودی x_i افزایش می‌یابد. بدین ترتیب در "شکل 2-ب)" ورودی x_i بر خروجی تأثیر دارد. روش مقایسه تأثیر این ورودی نسبت به ورودی‌های دیگر در ادامه توضیح داده می‌شود. همان‌طور که گفته شد برای محاسبه فاصله از آمار کولموگروف-اسمیرنوف طبق معادله (6) استفاده می‌کنیم.

$$KS(x_i) = \max_y |F_y(y) - F_{y|x_i}(y)| \quad (6)$$

از آنجایی که KS به مقداری که ورودی x_i را در آن ثابت در نظر گرفته‌ایم وابسته است، شاخص حساسیت PAWN که با T_i نشان داده می‌شود به عنوان آماره (بیشترین یا میانگین) تمامی حالاتی که x_i می‌تواند داشته باشد، به صورت معادله (7) تعریف می‌شود.

$$T_i(x_i) = \text{stat}_{x_i}[KS(x_i)] \quad (7)$$

با این تعریف:

- ✓ T_i بین 0 و 1 تغییر می‌کند.

¹ Sensitivity Analysis (SA)

² Factor Prioritization

³ Factor Fixing

⁴ Factor Mapping

نشان می‌دهد. بدین ترتیب تعداد کل اجراهایی که از مدل برای M ورودی و محاسبه شاخص‌های PAWN از معادله (9) باید گرفته شود برابر است با $N_u + n \times N_c \times M$. این نکته قابل ذکر است که مقادیر n و N_c و N_u با سعی و خطا به دست می‌آیند. از آنجایی که n تعداد نمونه انتخاب شده برای متغیر ثابت در نظر گرفته شده است و از فضای یک‌بعدی انتخاب می‌شود، منطقی است که عددی کوچک‌تر از بقیه مقادیر باشد (مقداری بین 10 تا 50).
 N_u و N_c از فضای با بعد M و $M-1$ انتخاب می‌شوند. این دو فضا به ترتیب فضای همه ورودی‌ها و فضای همه ورودی‌ها به جز ورودی ثابت هستند. با توجه به‌سادگی محاسبه شاخص PAWN، مقاوم بودن روش نسبت به مقادیر انتخاب شده N_u و N_c به راحتی با اجرای مجدد محاسبات و نمونه‌گیری مجدد با اندازه‌های جدید تخمین زده می‌شود.

8- آزمون دو-نمونه ای کولموگروف-اسمیرنوف

در تحلیل حساسیت با هدف ثابت کردن عامل‌ها (FF)، روش PAWN در کنار آزمون دو-نمونه‌ای کولموگروف-اسمیرنوف مورد استفاده قرار می‌گیرد. طبق این آزمون فرض برابری دو نمونه $F_{y|x_i}(0)$ و $F_y(0)$ هنگامی رد می‌شود که معادله (10) برقرار باشد [20].

$$KS > c(\alpha) \sqrt{\frac{N_u + N_c}{N_u N_c}} \quad (10)$$

در معادله (10)، KS فاصله کولموگروف-اسمیرنوف بین دو توزیع تجمعی تجربی، N_u و N_c تعداد نمونه‌هایی است که برای ساخت تابع توزیع تجمعی تجربی استفاده شده‌اند، α سطح اطمینان موردنظر و مقدار بحرانی c از جداول ارائه شده در مرجع [22] محاسبه می‌شود.
 با رد فرض برابری دو نمونه، نتیجه می‌شود که ورودی x_i در خروجی مؤثر است. و اگر در تمام n حالت از ورودی x_i فرض برابری رد نشود، آنگاه ورودی x_i در خروجی بی تأثیر است.

یکی دیگر از مزیت‌های استفاده از روش شاخص PAWN این است که می‌توان آنالیز حساسیت را در محدوده مشخصی از خروجی بررسی کرد. برای مثال اگر بخواهیم آنالیز حساسیت را محدوده‌ای که $y > 50$ انجام

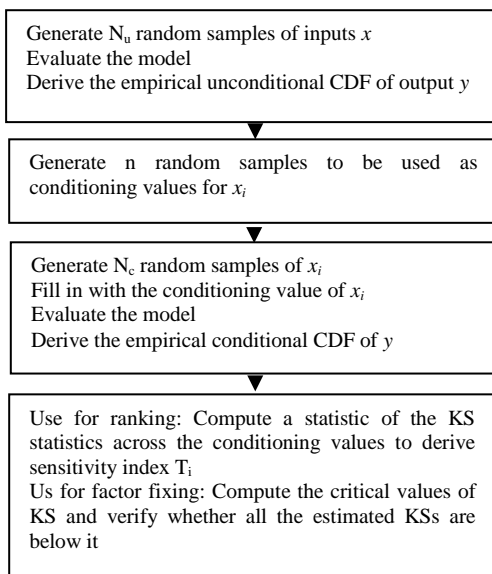


Fig. 3 The steps in the numerical implementation of the PAWN index [20]

شکل 3 مراحل محاسبه شاخص حساسیت PAWN [20]

✓ هرچه مقدار T_i کمتر باشد تأثیر x کمتر است.
 ✓ اگر $T_i = 0$ باشد ورودی x_i تأثیری بر خروجی ندارد.
 شاخص PAWN برای هر دو حالت اولویت‌بندی عامل‌ها (FP) و ثابت کردن عامل‌ها (FF) مناسب است. این شاخص تمامی شرایطی که برای یک شاخص خوب گفته شد، دارا می‌باشد. در حقیقت این شاخص: کلی، قابل شمارش و مستقل از مدل می‌باشد. همچنین اثر وابستگی به شرایط KS با استفاده از آماره آن (بیشترین یا میانگین) نسبت به x_i حذف می‌گردد. این شاخص برای تفسیر بسیار آسان است چون به‌عنوان فاصله تعریف شده است و مقدار عددی آن به واحد اندازه‌گیری y وابسته نیست. محاسبه کردن این شاخص آسان است و بدین ترتیب آنالیز پایداری آن امکان‌پذیر می‌باشد [20].

7- اجرای عددی روش تحلیل حساسیت PAWN

از آنجایی که محاسبه تحلیلی شاخص T_i در بیشتر موارد غیرممکن یا بسیار سخت است، استفاده از تقریب ارائه شده در معادله (8) توصیه می‌شود.

$$KS(x_i) = \max_y |F_{y|x_i}(y) - F_y(y)| \quad (8)$$

بدین ترتیب معادله (6) به‌صورت معادله (8) تقریب زده می‌شود. که در آن $F_{y|x_i}(0)$ و $F_y(0)$ به ترتیب تابع تجربی توزیع تجمعی بدون شرط و مشروط می‌باشد. $F_y(0)$ با N_u نمونه از تمام فضای ورودی و $F_{y|x_i}(0)$ با N_c نمونه از فضای غیرثابت ورودی درحالی‌که ورودی x_i ثابت در نظر گرفته شده است، تقریب زده می‌شوند.

بدین ترتیب معادله (7) نیز به‌صورت معادله (9) خواهد بود.

$$\hat{T}_i(x_i) = \text{stat}_{x_i=x_i^{(1)}, \dots, x_i^{(n)}} [KS(x_i)] \quad (9)$$

که در آن آماره، با توجه به n نمونه تصادفی ثابت برای ورودی x_i محاسبه خواهد شد. "شکل 3" مراحل محاسبه عددی شاخص PAWN را

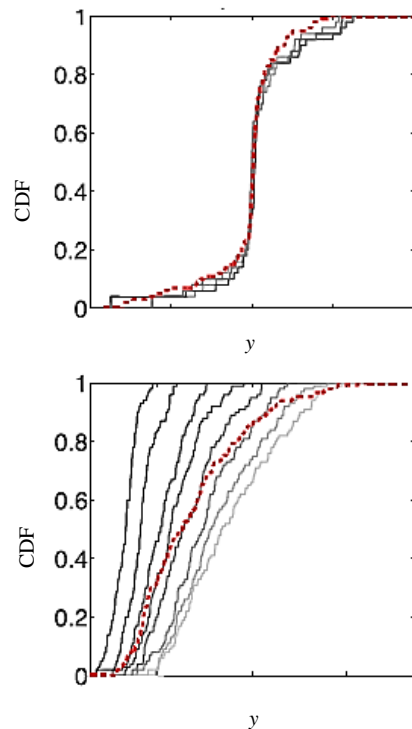


Fig. 2 Two illustrative examples of Cumulative Distribution Functions (CDFs) of the model output y [20]

شکل 2 دو مثال از تابع توزیع تجمعی خروجی مدل y [20]

اسمیرنوف در حالت $\alpha=0.05$ که در ردیف سوم "شکل 4" نشان داده شده

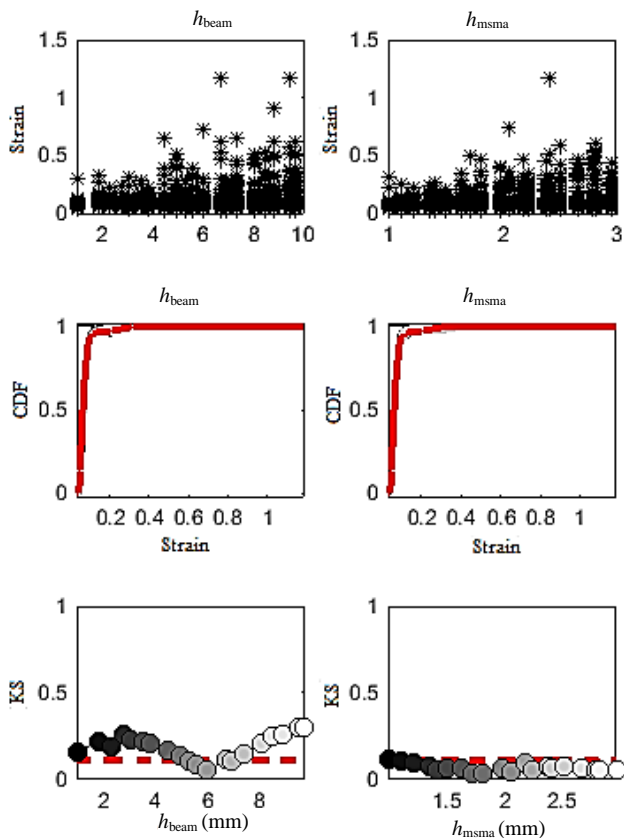


Fig. 5 The third and fourth inputs. Top panels: scatter plots of the model. Middle panels: empirical unconditional output distribution and conditional ones. Bottom panels: Kolmogorov-Smirnov statistic at different conditioning values of x_i .

شکل 5 ورودی‌های دوم و سوم، ردیف اول؛ نمودارهای پراکندگی، ردیف دوم؛ مقایسه توابع توزیع تجمعی تجربی در حالت مشروط و بدون شرط، ردیف سوم؛ فاصله کولموگروف-اسمیرنوف در مقادیر مختلف x_i

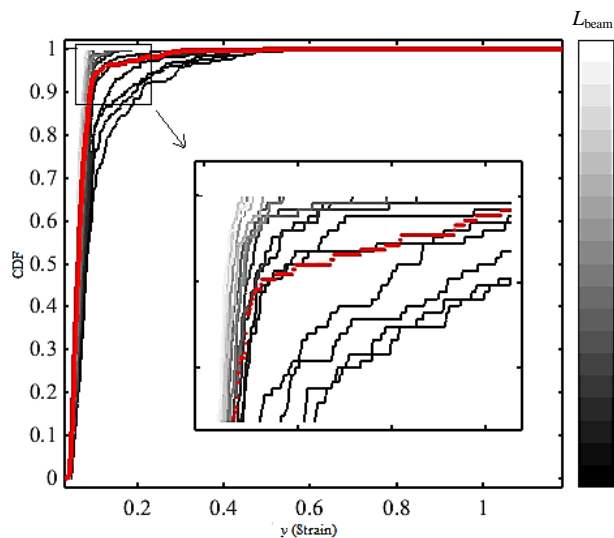


Fig. 6 Empirical unconditional output distribution and conditional ones for length of beam

شکل 6 مقایسه توابع توزیع تجمعی تجربی در حالت مشروط و بدون شرط، برای طول تیر

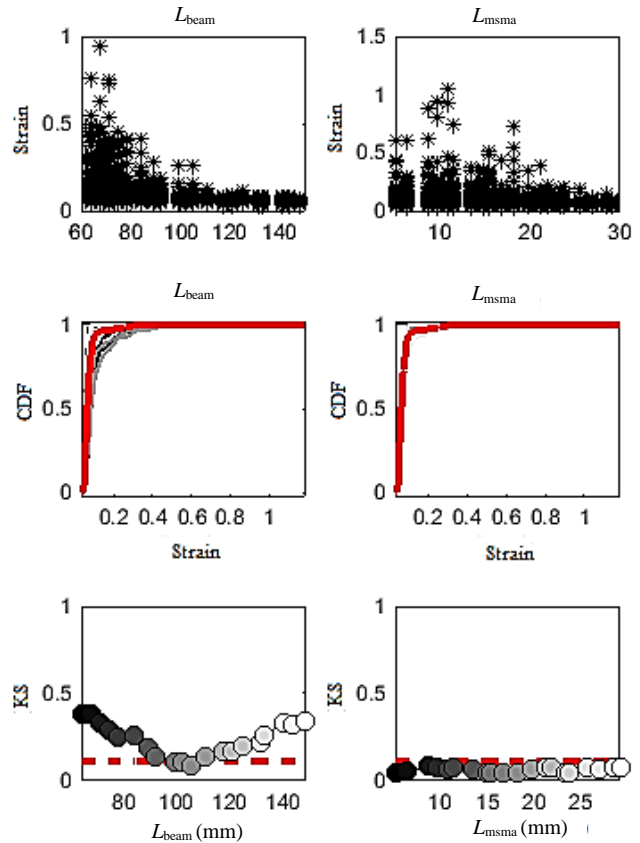


Fig. 4 The first and second inputs. Top panels: scatter plots of the model. Middle panels: empirical unconditional output distribution and conditional ones. Bottom panels: Kolmogorov-Smirnov statistic at different conditioning values of x_i .

شکل 4 ورودی‌های اول و دوم، ردیف اول؛ نمودارهای پراکندگی، ردیف دوم؛ مقایسه توابع توزیع تجمعی تجربی در حالت مشروط و بدون شرط، ردیف سوم؛ فاصله کولموگروف-اسمیرنوف در مقادیر مختلف x_i

دهیم معادله (8) به صورت معادله (11) خواهد بود.

$$KS(x_i) = \max_{y>50} |\hat{F}_y(y) - \hat{F}_{y|x_i}(y)| \quad (11)$$

ذکر این نکته ضروری است: از آنجایی که محاسبه شاخص PAWN با

روش‌های آسانی انجام می‌شود نیاز به نمونه‌گیری مجدد نیست و می‌توان با نمونه‌های به‌دست آمده از اجرای الگوریتم، در محدوده موردنیاز آنالیز حساسیت را انجام داد.

9-نتایج و بحث

بعد از ارائه مدل و توضیح روش تحلیل حساسیت PAWN در این بخش نتایج تحلیل برداشت‌کننده انرژی مطابق "شکل‌های 4 تا 8" ارائه می‌شود. محدوده متغیرها به صورت جدول 1 تعریف شده است.

برای تحلیل نمودارهای رسم شده ابتدا نمودارهای ورودی اول (طول تیر) را مورد بررسی قرار می‌دهیم. با توجه به نمودار ردیف اول در "شکل 4"، هرچه طول تیر در سطح‌های مختلف تغییر می‌کند، مقدار خروجی مدل نیز تغییر محسوسی خواهد داشت. در این شکل با تغییر طول تیر، نقاط کرنش‌های خاصی تجمع کرده‌اند. بدین ترتیب تغییر در میزان طول تیر، تأثیر چشم‌گیری در خروجی خواهد داشت. در "شکل 6" این اختلاف بهتر نمایش داده شده است. این نکته نشان‌دهنده تأثیرگذاری زیاد تغییرات ورودی موردنظر بر خروجی است. با استفاده از آزمون دو-نمونه‌ای کولموگروف-

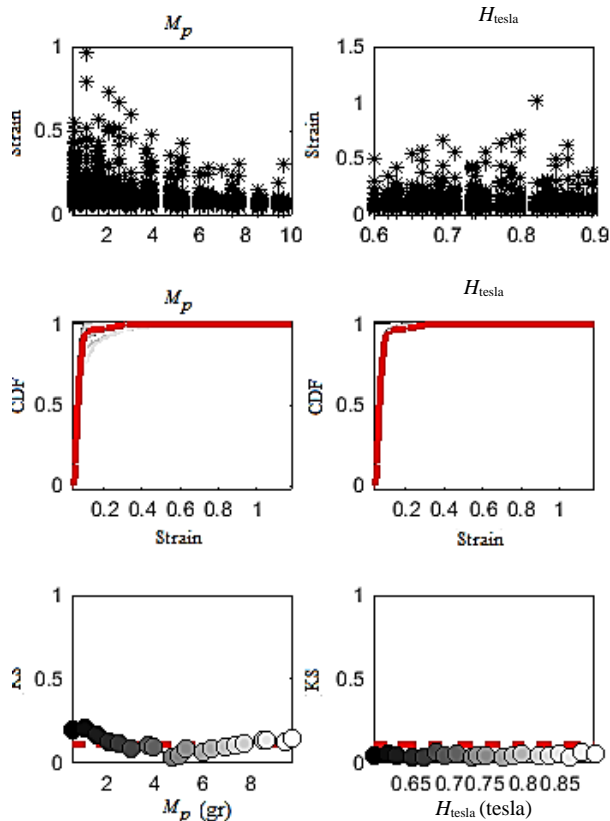


Fig. 8 The seventh and eighth inputs. Top panels: scatter plots of the model. Middle panels: empirical unconditional output distribution and conditional ones. Bottom panels: Kolmogorov-Smirnov statistic at different conditioning values of x_i .

شکل 8 ورودی‌های هفتم و هشتم، ردیف اول؛ نمودارهای پراکندگی، ردیف دوم؛ مقایسه توابع توزیع تجمعی تجربی در حالت مشروط و بدون شرط، ردیف سوم؛ فاصله کولموگروف-اسمیرنوف در مقادیر مختلف x_i .

ورودی‌های دیگر بسیار کم است. همچنین با توجه به آزمون دو-نمونه‌ای کولموگروف-اسمیرنوف در حالت $\alpha = 0.05$ ، می‌توان از تأثیر تغییرات این ورودی‌ها در خروجی، صرف‌نظر کرد و آن‌ها را ثابت در نظر گرفت.

ورودی سوم و پنجم نیز مشابه ورودی اول در خروجی تأثیر چشم‌گیری دارند. ورودی هفتم از ورودی‌های تأثیرگذار، تأثیر کمتری بر خروجی می‌گذارد اما این تأثیر طبق معیار به حدی نیست که بتوان این ورودی هفتم را ثابت در نظر گرفت.

10- شاخص‌های تحلیل حساسیت PAWN

بعد از بررسی تأثیر ورودی‌ها در سطوح مختلف بر کرنش پیش‌بینی شده، در این قسمت تحلیل حساسیت PAWN برای تحلیل میزان حساسیت کرنش و RMS^2 ولتاژ خروجی آمده است. مقدار تغییرات میدان مغناطیسی به‌طور مستقیم با کرنش اعمال شده به آلیاژ رابطه دارد. همچنین ابعاد آلیاژ که تشکیل‌دهنده سطح مقطع عبوری شار مغناطیسی است، تأثیر زیادی بر خروجی خواهد داشت. موارد ذکر شده در جدول 2 و "شکل‌های 9 و 10" قابل مشاهده است.

11- نتیجه‌گیری

در این مقاله خروجی یک مدل برداشت‌کننده انرژی در حالت کوپل با آلیاژ

³ Root Mean Square

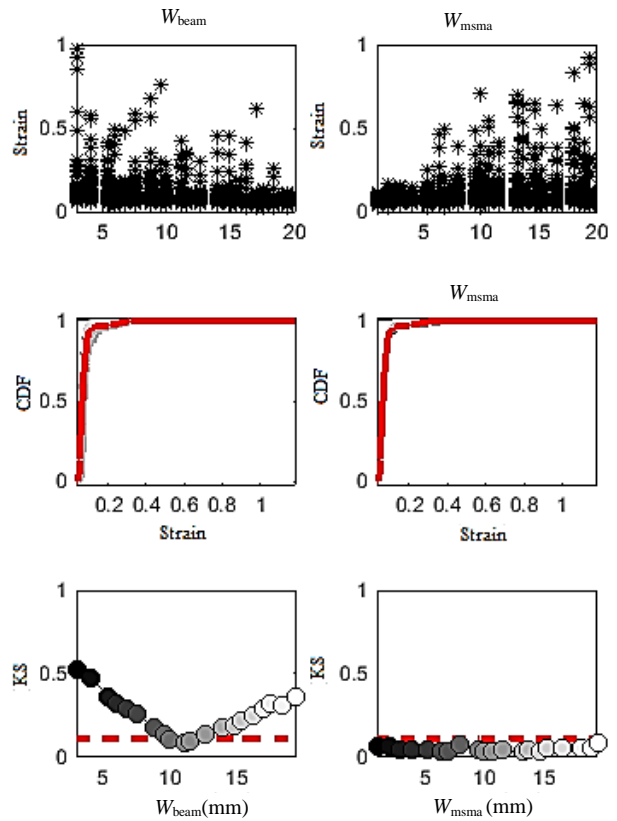


Fig. 7 The fifth and sixth inputs. Top panels: scatter plots of the model. Middle panels: empirical unconditional output distribution and conditional ones. Bottom panels: Kolmogorov-Smirnov statistic at different conditioning values of x_i .

شکل 7 ورودی‌های پنجم و ششم، ردیف اول؛ نمودارهای پراکندگی، ردیف دوم؛ مقایسه توابع توزیع تجمعی تجربی در حالت مشروط و بدون شرط، ردیف سوم؛ فاصله کولموگروف-اسمیرنوف در مقادیر مختلف x_i .

جدول 1 معرفی متغیرهای طراحی و محدوده آن‌ها

Table 1 Design variables and their boundaries

پارامتر	نماینده	حد پایین ^۲	حد بالا ^۱
طول تیر	L_{beam} (mm)	60	150
طول آلیاژ	L_{msma} (mm)	5	30
ارتفاع تیر	h_{beam} (mm)	1	10
ارتفاع آلیاژ	h_{msma} (mm)	1	3
عرض تیر	w_{beam} (mm)	3	20
عرض آلیاژ	w_{msma} (mm)	1	20
جرم محک	M_p (gr)	0.5	10
میدان بایاس	H (tesla)	0.6	0.9

است، می‌توان میزان تأثیر هر ورودی در هر سطح را بر خروجی مدل مشخص کرد.

با توجه به این‌که وقتی طول تیر در سطح‌های میانی قرار دارد، مقدار فاصله کولموگروف-اسمیرنوف بین دو توزیع تجمعی تجربی کمتر از مقدار موردنظر است، هنگامی‌که این ورودی در سطوح میانی قرار دارد می‌توان از تأثیر تغییرات آن بر خروجی صرف‌نظر کرد.

مشابه تحلیل انجام شده برای ورودی اول، می‌توان دریافت که تأثیر تغییرات ورودی‌های دوم، چهارم، ششم و هشتم در خروجی نسبت به

¹ upper bound
² lower bound

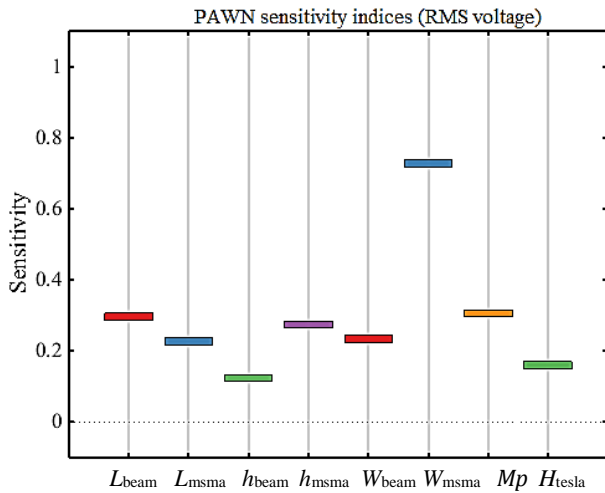


Fig. 10 Compute the PAWN index for RMS voltage

شکل 10 محاسبه شاخص حساسیت PAWN برای ولتاژ

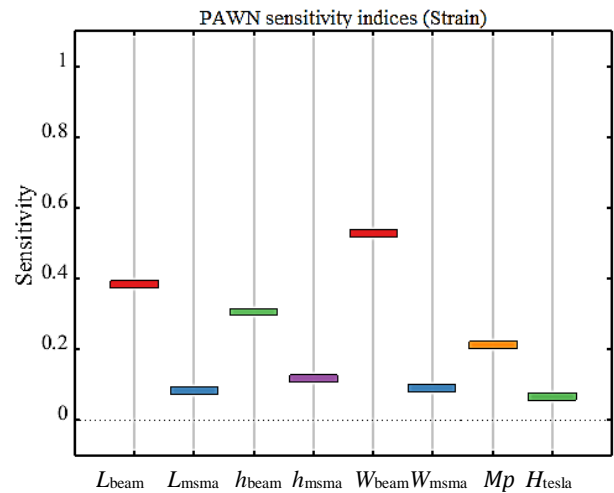


Fig. 9 Compute the PAWN index for strain

شکل 9 محاسبه شاخص حساسیت PAWN برای کرنش

تاثیر زیادی بر کرنش خروجی و نتیجه خواهد گذاشت. (ممکن است

کرنش در محدوده ای قرار گیرد که مدل نامعتبر گردد)

- در طراحی و بهینه‌سازی برداشت‌کننده با توجه به محدودیت‌های موردنیاز و در نظر گرفتن کرنش، می‌توان طول، ضخامت و عرض آلیاژ را در محدوده ماکزیمم و مینیمم بررسی شده و با معیار مورد نظر، ثابت در نظر گرفت.

- در طراحی و بهینه‌سازی برداشت‌کننده با توجه به محدودیت‌های موردنیاز و در نظر گرفتن RMS ولتاژ، می‌توان ارتفاع تیر را در محدوده ماکزیمم و مینیمم بررسی شده و با معیار مورد نظر، ثابت در نظر گرفت.

- در تحلیل RMS ولتاژ، اثر ورودی‌ها تغییر کرده است و این نشانه پیچیده بودن مدل و تاثیر ورودی‌ها بر یکدیگر است.

- با در نظر گرفتن حساسیت‌های به‌دست آمده، و طبق شاخص تحلیل حساسیت PAWN رتبه‌بندی تاثیرگذارترین ورودی‌ها بر کرنش خروجی به ترتیب عبارتند از: عرض تیر، طول تیر، ارتفاع تیر، جرم محک، ارتفاع آلیاژ، عرض آلیاژ، طول آلیاژ و میدان بایاس

- با در نظر گرفتن حساسیت‌های به‌دست آمده، و طبق شاخص تحلیل حساسیت PAWN رتبه‌بندی تاثیرگذارترین ورودی‌ها بر RMS ولتاژ خروجی به ترتیب عبارتند از: عرض آلیاژ، جرم محک، طول تیر، ارتفاع آلیاژ، عرض تیر، طول آلیاژ، میدان بایاس و ارتفاع تیر

Table 2 PAWN sensitivity indices

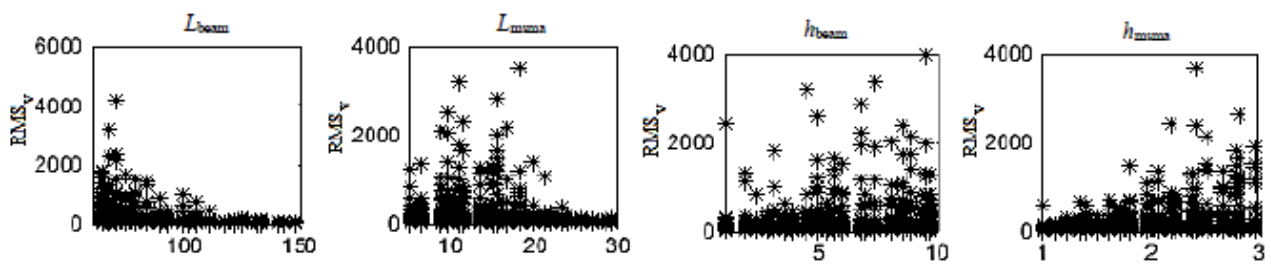
عنوان	شاخص حساسیت PAWN برای کرنش	شاخص حساسیت PAWN برای ولتاژ
طول تیر	0.3834	0.2960
طول آلیاژ	0.0829	0.2280
ارتفاع تیر	0.3057	0.1234
ارتفاع آلیاژ	0.1177	0.2743
عرض تیر	0.5291	0.2349
عرض آلیاژ	0.0914	0.7269
جرم محک	0.2126	0.3063
میدان بایاس	0.0674	0.1600

حافظه دار و روش PAWN به‌عنوان روشی کارآمد و آسان برای تحلیل حساسیت کلی معرفی گردید. سپس آنالیز حساسیت هر یک از ورودی‌ها بر مقدار کرنش خروجی از مدل با روش ذکر شده انجام شد و در نهایت با توجه به لزوم بررسی ولتاژ در برداشت‌کننده‌های انرژی تحلیل حساسیت ولتاژ خروجی انجام گرفت.

از آنچه که در این تحقیق انجام شد نتیجه می‌شود که:

- چنانچه ساخت برداشت‌کننده انرژی در مدل تیر دوسرگیردار به همراه قطعات آلیاژ حافظه دار مغناطیسی انجام شود، مقدار عرض تیر بیشترین تاثیر را در کرنش خروجی دارد و هرگونه اشتباه در این بُعد،

12- ضمیمه



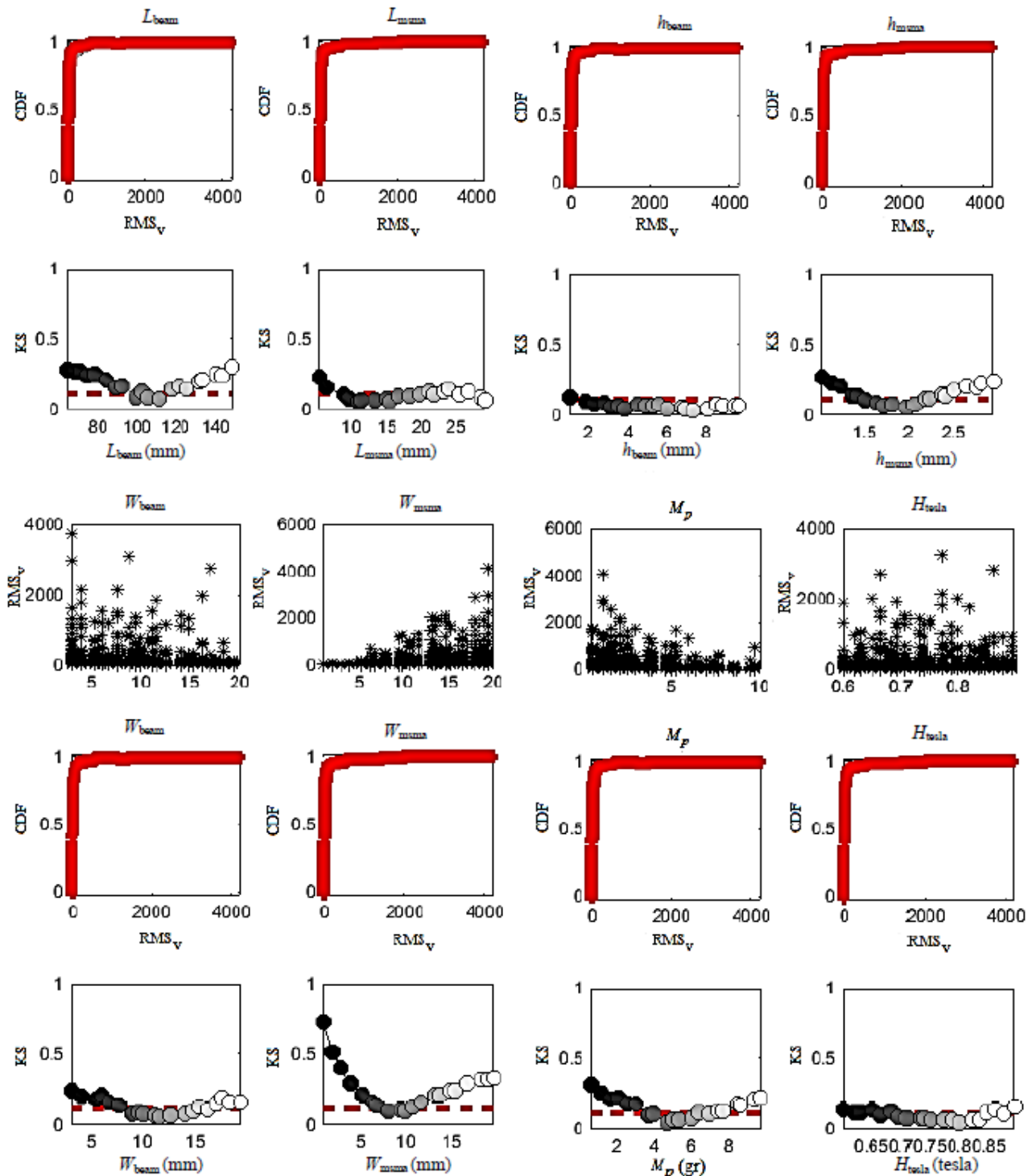


Fig. 11 Result for RMS voltage. Top panels: scatter plots of the model. Middle panels: empirical unconditional output distribution and conditional ones. Bottom panels: Kolmogorov-Smirnov statistic at different conditioning values of x_i .

شکل 11 نتایج برای RMS ولتاژ. ردیف اول؛ نمودارهای پراکندگی، ردیف دوم؛ مقایسه توابع توزیع تجمعی تجربی در حالت مشروط و بدون شرط، ردیف سوم؛ فاصله کولموگوروف-اسمیرنوف در مقادیر مختلف x_i

1, pp. 28-36, 2005.

- [4] S. R. Anton, D. J. Inman, Vibration energy harvesting for unmanned aerial vehicles, *The 15th International Symposium on: Smart Structures and Materials & Nondestructive Evaluation and Health Monitoring*, International Society for Optics and Photonics, pp. 692824-692824-12, 2008.
- [5] A. Abdelkefi, M. R. Hajj, A. H. Nayfeh, Sensitivity analysis of piezoelectric energy harvesters, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* Vol. 23, No. 13, pp. 1523-1531, 2012.
- [6] S. B. Ayed, A. Abdelkefi, F. Najjar, M. R. Hajj, Design and performance of variable-shaped piezoelectric energy harvesters, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 25, No. 2, pp. 174-186, 2014.

13- مراجع

- [1] T. Ng, W. Liao, Sensitivity analysis and energy harvesting for a self-powered piezoelectric sensor, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 16, No. 10, pp. 785-797, 2005.
- [2] J. M. Rabaey, M. J. Ammer, J. L. da Silva, D. Patel, S. Roundy, PicoRadio supports ad hoc ultra-low power wireless networking, *Computer*, Vol. 33, No. 7, pp. 42-48, 2000.
- [3] S. Roundy, E. S. Leland, J. Baker, E. Carleton, E. Reilly, E. Lai, B. Otis, J. M. Rabaey, P. K. Wright, V. Sundararajan, Improving power output for vibration-based energy scavengers, *IEEE Pervasive Computing*, Vol. 4, No.

- harvester using magnetic shape memory alloy, *Smart Materials and Structures*, Vol. 25, No. 10, pp. 105024, 2016.
- [15] H.Sayyaadi, M.Effatpanah, M.A. Askari Farsangi, Optimization of energy harvesting from vibration of beam coupled with magnetic shape memory alloys, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 12, pp. 675-684, 2016. (in Persian فارسی)
- [16] A. Saltelli, M. Ratto, T. Andres, F. Campolongo, J. Cariboni, D. Gatelli, M. Saisana, S. Tarantola, *Global Sensitivity Analysis: The Primer*, pp. 10-40, New York: Wiley, 2008.
- [17] Q. Liu, T. Homma, A new computational method of a moment-independent uncertainty importance measure, *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 94, No. 7, pp. 1205-1211, 2009.
- [18] A. Saltelli, Sensitivity analysis for importance assessment, *Risk Analysis*, Vol. 22, No. 3, pp. 579-590, 2002.
- [19] R. L. Iman, S. C. Hora, A robust measure of uncertainty importance for use in fault tree system analysis, *Risk Analysis*, Vol. 10, No. 3, pp. 401-406, 1990.
- [20] F. Pianosi, T. Wagener, A simple and efficient method for global sensitivity analysis based on cumulative distribution functions, *Environmental Modelling & Software*, Vol. 67, pp. 1-11, 2015.
- [21] M. A. Stephens, *Introduction to Kolmogorov (1933) On the Empirical Determination of a Distribution*, in: S. Kotz, N. L. Johnson, *Breakthroughs in Statistics: Methodology and Distribution*, Eds., pp. 93-105, New York, NY: Springer New York, 1992.
- [22] J. Wall, Practical statistics for astronomers-ii. correlation, data-modelling and sample comparison, *Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society*, Vol. 37, pp. 519, 1996.
- [7] Z. Yan, A. Abdelkefi, M. R. Hajj, Piezoelectric energy harvesting from hybrid vibrations, *Smart Materials and Structures*, Vol. 23, No. 2, pp. 025026, 2014.
- [8] H. R. N. H. Sayyaadi, M. A. Askari Farsangi, An investigation on effectiveness of dimension on Magnetic Shape Memory Alloy based energy harvester with two different configurations, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 1, pp. 136-144, 2017. (in Persian فارسی)
- [9] I. Karaman, B. Basaran, H. Karaca, A. Karsilayan, Y. Chumlyakov, Energy harvesting using martensite variant reorientation mechanism in a NiMnGa magnetic shape memory alloy, *Applied Physics Letters*, Vol. 90, No. 17, pp. 172505, 2007.
- [10] N. N. Sarawate, *Characterization and Modeling of the Ferromagnetic Shape Memory Alloy Ni-Mn-Ga for Sensing and Actuation*, Thesis, The Ohio State University, 2008.
- [11] N. M. Bruno, *Energy Harvesting Using Martensitic Variant Reorientation in Ni₅₀Mn₂₈.₅Ga₂₁.₅ Magnetic Shape Memory Alloy*, Thesis, Northern Arizona University, 2011.
- [12] I. Nelson, C. Ciocanel, D. LaMaster, H. Feigenbaum, The Impact of Boundary Conditions on the Response of NiMnGa Samples in Actuation and Power Harvesting Applications, *ASME 2013 Conference on Smart Materials*, American Society of Mechanical Engineers, pp. V001T01A021-V001T01A021, 2013.
- [13] A. Saren, D. Musiienko, A. Smith, J. Tellinen, K. Ullakko, Modeling and design of a vibration energy harvester using the magnetic shape memory effect, *Smart Materials and Structures*, Vol. 24, No. 9, pp. 095002, 2015.
- [14] H. S. M. A. Askari Farsangi, M. R. Zakerzadeh, A novel inertial energy