



بررسی تاثیر پارامترهای هندسی بر جابه جایی خارج از صفحه میکرو تیر پیزوالکتریک با سطح مقطع T شکل

علی عطار^۱، محمد طهماسبی پور^{۲*} و محمد دهقان^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد سیستم‌های میکرو و نانوالکترومکانیک، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران

^۲ استادیار، سیستم‌های میکرو و نانوالکترومکانیک، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران

^۳ دانشجوی کارشناسی ارشد سیستم‌های میکرو و نانوالکترومکانیک، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۱/۱۵؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۷/۰۷/۲۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۱/۰۸

چکیده

دستیابی به جابه‌جایی خارج از صفحه بالاتر در میکروتیرها موجب افزایش حساسیت و دقت میکرو سنسورها و افزایش دامنه جابه‌جایی و کارایی میکرو محرک‌های مبتنی بر این میکروتیرها می‌شود. در این مقاله، جابه‌جایی خارج از صفحه یک میکروتیر پیزوالکتریک با سطح مقطع T شکل به روش المان محدود مدل‌سازی شده است. به منظور افزایش جابه‌جایی خارج از صفحه این میکروتیر، تاثیر پارامترهای هندسی بر جابه‌جایی خارج از صفحه میکروتیر مذکور به روش تاگوچی بررسی شده است. سطح بهینه متغیرهای هندسی میکروتیر برای دستیابی به بیشترین جابه‌جایی خارج از صفحه میکروتیر، با تحلیل ضرایب سیگنال به نویز و ترتیب اهمیت تاثیر متغیرهای هندسی بر جابه‌جایی خارج از صفحه با تحلیل واریانس تعیین شده است. در بین مشخصات هندسی تحلیل شده، طول میکرو کانتیلور (L) بیشترین تاثیر را روی میزان جابه‌جایی خارج از صفحه دارد. با افزایش طول میکرو کانتیلور، جابه‌جایی خارج از صفحه آن بیشتر می‌شود. پس از طول، عمق جان تیر (h)، بیشترین تاثیر را بر جابه‌جایی نوک میکرو کانتیلور دارد. هر چه اندازه عمق جان تیر کمتر باشد، میزان جابه‌جایی میکرو کانتیلور بیشتر است. با استفاده از سطوح بهینه متغیرهای هندسی، مقدار جابه‌جایی خارج از صفحه 296.3 میکرومتر بدست آمد که حدود $2/3$ برابر نتیجه آخرین تحقیق انجام شده در این زمینه است.

کلمات کلیدی: میکروتیر؛ پیزوالکتریک؛ جابه‌جایی خارج از صفحه؛ تحلیل المان محدود.

Investigation of the Effect of Geometrical Parameters on the Out-of-Plane Displacement of a T-Shaped Piezoelectric Microcantilever

A. Attar¹, M. Tahmasebipour^{2,*}, M. Dehghan³

¹ Master Student, Faculty of New Sciences and Technologies, University of Tehran, Tehran, Iran.

² Assist. Prof., Faculty of New Sciences and Technologies, University of Tehran, Tehran, Iran.

³ Master Student, Faculty of New Sciences and Technologies, University of Tehran, Tehran, Iran.

Abstract

Achieving to the higher out-of-plane displacement for a piezoelectric microcantilever enhances sensitivity and accuracy of the related microsensors and causes increase in displacement and performance of the related microactuators. In this paper, out-of-plane displacement of a piezoelectric microcantilever with T-Shaped cross section has been modeled using finite element method. With the aim of increase in out-of-plane displacement of this microcantilever, effect of the geometrical parameters on the out-of-plane displacement of the microcantilever has been investigated using the Taguchi method. Optimum levels of the piezoelectric microcantilever geometrical parameters to achieve the maximum out-of-plane displacement were obtained using analysis of the signal to noise ratios and order of the effect importance of geometrical parameters on the out-of-plane displacement was specified using analysis of variance (ANOVA). Among the studied parameters, length of the microcantilever (L) has the most influence on the out-of-plane displacement. The higher the length of the microcantilever, the more the out-of-plane displacement. Then, beam web depth (h) has the most effect on the out-of-plane displacement of the microcantilever. The less the web depth, the more the out-of-plane displacement of the microcantilever. Using optimum levels of the geometrical parameters, out-of-plane displacement of $296.3 \mu\text{m}$ was obtained that is about 2.3 times of the result of the latest research conducted in this field.

Keywords: Microcantilever; Piezoelectric; Out-of-Plane Displacement; Finite Element Analysis.

* نویسنده مسئول؛ تلفن: ۰۲۱-۸۶۹۰۱۸۷

آدرس پست الکترونیک: tahmasebipour@ut.ac.ir

۱- مقدمه

میکرو کانتیلورهای پیزوالکتریک، کاربردهای متنوعی در حوزه تکنولوژی سیستم‌های میکروالکترومکانیک دارند. به عنوان مثال، می‌توان به کاربرد آن‌ها در حسگرهای شیمیایی [۱]، بایوسنسورها [۲]، حسگرهای نیرو [۳]، میکروسوئیچها [۴ و ۵]، میکروشتاب‌سنجها [۶ و ۷]، میکرو آینه‌ها [۸]، سیستم‌های موقعیت دهی [۹] و ذخیره سازی انرژی [۱۰-۱۲] اشاره کرد. وجود خاصیت پیزوالکتریک در برخی مواد، باعث تبدیل کرنش مکانیکی به انرژی الکتریکی و برعکس می‌شود. قابلیت مذکور این امکان را ایجاد می‌کند که در میکرو کانتیلورهای پیزوالکتریک، با اعمال میدان الکتریکی، جابه‌جایی و نیروی قابل توجهی در نوک میکرو کانتیلورها به وجود آید [۱۳-۱۵]. یکی از مواد دارای خاصیت پیزوالکتریکی قوی، ماده ای است با ترکیب شیمیایی $[Zr_xTi_{1-x}]O_3Pb$ که به PZT معروف است. این ماده دارای خاصیت ایزوتروپیک عرضی است، به این معنا که در راستای یک محور، خاصیت پیزوالکتریک قویتری در مقایسه با دو محور دیگر دارد. به عبارتی دیگر، در یک صفحه خاصیت ایزوتروپیک و در جهت عمود بر این صفحه خاصیت اورتوتروپیک دارد [۱۶].

در سال ۱۹۹۵ مینه و همکاران، موفق به ساخت دو میکرو تیر پیزوالکتریک موازی شدند که با اعمال جریان مستقیم (فرکانس پایین) به آنها جابه‌جایی ۴ میکرومتر و در اولین مد فرکانس تشدید جابه‌جایی ۳۰ میکرومتر ایجاد کردند [۱۷]. در سال ۱۹۹۶ ایتوه و همکاران، یک میکرو تیر از جنس PZT با طول ۲۰۰ میکرومتر ساختند که در فرکانس تشدید ۶۳/۸ کیلوهرتز به ماکزیمم جابه‌جایی ۱/۵ میکرومتر رسید [۱۸]. در سال ۱۹۹۹ کینگ مینگ و اریک کریس، یک میکرو تیر از جنس PZT ساخته و به بررسی جابه‌جایی نوک کانتیلور در ضخامت‌های مختلف و در میدان‌های الکتریکی متفاوت پرداختند [۱۹]. در سال ۲۰۰۶ شی و همکاران، جابه‌جایی نوک میکرو تیر چند لایه پیزوالکتریک را بررسی کردند. نتیجه به دست آمده، نشان دهنده کاهش جابه‌جایی با افزایش لایه‌های کانتیلور بود [۲۰]. در سال ۲۰۰۷ هینون و همکاران، به بررسی جابه‌جایی نوک کانتیلور پیزوسرامیک PZ29 در ضخامت‌های مختلف و در میدان‌های الکتریکی متفاوت پرداختند [۲۱]. در سال ۲۰۰۷ پالوساری و

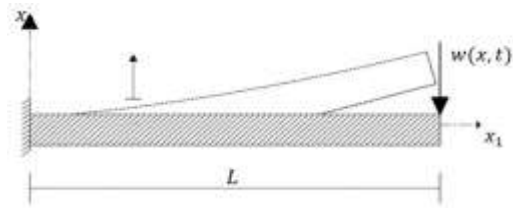
همکاران، به بررسی جابه‌جایی خطی و نمایی محرک پیزوالکتریک در میدان‌ها و ضخامت‌های مختلف پرداختند [۲۲]. ایده ساخت و استفاده از میکرو تیر پیزوالکتریکی با سطح مقطع T شکل، توسط متتی و همکارانش در سال ۲۰۱۱ مطرح و در سال ۲۰۱۳ توسعه داده شد [۲۳، ۲۴]. مزیت این میکرو تیرها امکان ایجاد جابه‌جایی‌هایی در صفحه و خارج از صفحه با استفاده از یک میکرو تیر است. با ساخت این میکرو کانتیلورها، مقدار جابه‌جایی خارج از صفحه ۱۲۹ میکرومتر بدست آمد.

دستیابی به جابه‌جایی خارج از صفحه بالاتر در میکرو تیرها موجب افزایش حساسیت و دقت میکرو سنسورها و افزایش دامنه جابه‌جایی و کارایی میکرو محرک‌های مبتنی بر این میکرو تیرها می‌شود. تأثیر پارامترهای هندسی میکرو تیر پیزوالکتریکی با سطح مقطع T شکل بر جابه‌جایی خارج از صفحه نوک آن، تاکنون مورد مطالعه قرار نگرفته است. در این مقاله به منظور افزایش جابه‌جایی خارج از صفحه ایجاد شده در این میکرو تیرها، تأثیر پارامترهای هندسی بر جابه‌جایی خارج از صفحه میکرو تیرهای مذکور به روش المان محدود تحلیل شده است. با بکارگیری روش تاگوچی در طراحی آزمایشات مدلسازی، سطوح بهینه پارامترهای هندسی برای دستیابی به جابه‌جایی خارج از صفحه بیشتر و ترتیب اهمیت پارامترهای مذکور با تحلیل واریانس (ANOVA)^۱ تعیین شده اند. با استفاده از سطوح بهینه متغیرهای هندسی، مقدار جابه‌جایی خارج از صفحه ۲۹۶/۳ میکرومتر بدست آمد که حدود ۲/۳ برابر نتیجه آخرین تحقیق انجام شده در این زمینه [۲۳] است.

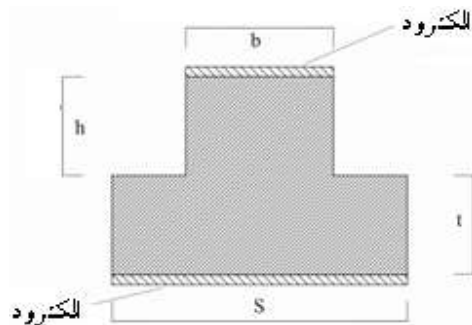
۲- کلیات مدلسازی

برای تحلیل میکرو تیرهای مورد مطالعه از نرم افزار المان محدود کامسول^۲ استفاده شده است. شکل ۱ تصویر راستای طولی نمای جانبی میکرو تیر با سطح مقطع T شکل و جابه‌جایی خارج از صفحه آن را نشان می‌دهد. پارامترهای هندسی سطح مقطع میکرو تیر، در شکل ۲ نشان داده شده است. روی سطح بالایی جان تیر و سطح زیرین فلنج،

^۱ Analysis of Variance^۲ COMSOL



شکل ۱- فرم شماتیک جابه‌جایی خارج از صفحه میکروتیر



شکل ۲- پارامترهای هندسی سطح مقطع میکروتیر

حالت، روش طراحی آزمایش تاگوچی^۲، ابزاری قوی برای کاهش تعداد آزمایش‌ها و صرفه جویی در هزینه و زمان است [۲۵]. در نتیجه برای بررسی تأثیر متغیرهای هندسی میکروتیر بر جابجایی خارج از صفحه نوک آن و تعیین شرایط بهینه برای دستیابی به حداکثر جابجایی، از روش تاگوچی استفاده شد. در این روش با استفاده از طرح‌های خاصی از آرایه‌های متعامد^۳ و انجام تعداد کمی آزمایش، امکان بررسی تأثیر متغیرهای یک فرآیند و بهینه سازی شرایط آن فراهم شده است. روش تاگوچی دارای گام‌های زیر است [۲۶-۲۷]:

- (۱) تعریف توابع اصلی فرآیند و متغیرهای مربوطه
- (۲) تعریف محدوده متغیرها و تعداد سطح آنها
- (۳) انتخاب یک آرایه متعامد مناسب برای تعریف چیدمان متغیرها و سطوح مربوطه و انجام آزمایش‌ها مطابق با آرایه مذکور
- (۴) مطالعه نتایج آزمایش‌ها به روش آنالیز ضرایب S/N ^۴ (سیگنال به نویز) برای تعیین سطح بهینه متغیرهای فرآیند

^۲ Taguchi

^۳ Orthogonal Array

^۴ Signal/Nois (S/N) Ratio

دوالکتروود لایه نشانی شده است که الکتروودهای مورد نیاز برای اعمال ولتاژ می‌باشند. مطابق شکل ۱، در اثر اعمال ولتاژ به الکتروودهای مذکور، در انتهای آزاد میکروتیر جابه‌جایی خارج از صفحه ایجاد می‌شود. جنس میکروتیر مذکور PZT-4 فرض شده است که در راستای ضخامت کانتیلور قطبی است. مشخصات این ماده در جدول ۱ آورده شده است. به علت ناچیز بودن ضخامت الکتروودها در مقایسه با ضخامت کانتیلور، در تحلیل المان محدود، تأثیر مکانیکی آن‌ها نادیده گرفته شده است.

مدل تحلیلی جابجایی نوک یک تیر از جنس PZT در مرجع [۱۹] ارائه شده است. این مدل بر اساس تئوری تیر اولیر- برنولی بنا نهاده شده است. برای تعیین معادله دیفرانسیلی حاکم بر رفتار تیر مذکور از اصل کار مجازی استفاده شده است.

جدول ۱- مشخصات PZT-4 [۱۸]

مقدار	خاصیت پیزوالکتریک
-122	d_{31} ثابت کرنش پیزوالکتریک (pm/V)
78	E مدول یانگ (GPa)
7600	ρ چگالی (kg/m^3)
0.3176	k_{31} ضریب کوپلینگ الکترومکانیکی
1.1510e-0.08	ϵ_{33} ضریب گذردهی (C^2m^{-2}/N)

۳- طراحی آزمایش‌های مدل سازی بر مبنای روش تاگوچی

روش تاگوچی ابزاری قوی برای طراحی آزمایش‌ها و طریقی ساده، مؤثر و سیستماتیک برای تعیین سطح بهینه متغیرهای فرآیند است. این روش در مقایسه با روش‌های سنتی، تعداد آزمایش‌های مورد نیاز برای مدل کردن توابع پاسخ^۱ را به شدت کاهش می‌دهد. روش‌های سنتی طراحی آزمایش، با تغییر یک پارامتر در یک زمان و ثابت نگهداشتن دیگر پارامترها عمل می‌کنند. بنابراین برای بررسی تأثیر منحصر به فرد هر پارامتر هزینه و زمان زیادی صرف می‌شود. در این

^۱ Response Functions

در رابطه ۱، y پاسخ آزمایش i ام و n تعداد تکرار هر آزمایش است. مقادیر جابه‌جایی خارج از صفحه میکروتیرهای مدل‌سازی شده و مقادیر ضرایب سیگنال به نویز مربوطه بر اساس آرایه متعامد L_{25} محاسبه شده و در جدول ۳ داده شده است.

در گام بعدی با استفاده از مقادیر سیگنال به نویزهای به دست آمده، میانگین نسبت سیگنال به نویز برای هر پارامتر در هر سطح محاسبه می‌شود. مقدار میانگین ضرایب سیگنال به نویز برای سطوح مختلف متغیرهای فرآیند محاسبه شده است که نتایج آن در جدول ۴ آورده شده است. شکل ۳ نشان دهنده تأثیر سطوح مختلف پارامترهای هندسی مورد مطالعه بر مقدار ضریب سیگنال به نویز است.

بر اساس نتایج جدول ۴ و شکل ۳ مشخص می‌شود که:

۱- افزایش طول کانتیلور L ، منجر به افزایش جابه‌جایی خارج از صفحه می‌شود؛ بنابراین برای دستیابی به حداکثر جابه‌جایی خارج از صفحه، سطح پنجم این متغیر بهترین سطح در محدوده مقادیر آزمایش شده است. مطابق با رابطه تحلیلی ارائه شده در مرجع [۲۳]، جابه‌جایی خارج از صفحه میکروتیر با توان دوم طول میکروتیر رابطه مستقیم دارد.

۲- افزایش b منجر به کاهش جابه‌جایی خارج از صفحه می‌گردد؛ بنابراین سطح اول این متغیر که دارای کمترین مقدار است، سطح بهینه متغیر برای دستیابی به بیشترین مقدار جابه‌جایی خارج از صفحه است.

۳- افزایش S منجر به افزایش جابه‌جایی خارج از صفحه نوک میکروتیر می‌شود؛ در نتیجه جابه‌جایی خارج از صفحه نوک میکروتیر در سطح پنجم از این متغیر، بیشترین مقدار است.

۴- افزایش t تأثیر قابل توجهی بر جابه‌جایی خارج از صفحه نوک میکروتیر ندارد.

۵- افزایش h منجر به کاهش جابه‌جایی خارج از صفحه نوک میکروتیر می‌گردد. بنابراین برای دستیابی به حداکثر جابه‌جایی خارج از صفحه، استفاده از سطح اول این متغیر توصیه می‌شود.

۵) بررسی ضرایب S/N به روش آنالیز واریانس (ANOVA)^۱ برای تعیین میزان اهمیت تأثیر متغیرها بر تابع مورد مطالعه

هدف از این تحقیق، بررسی تأثیر ۵ متغیر هندسی میکروتیر (L طول، b ضخامت جان تیر، S پهنای فلنج، t ضخامت فلنج و h عمق جان تیر) بر جابه‌جایی خارج از صفحه نوک میکروتیر است؛ بنابراین مقدار جابه‌جایی خارج از صفحه میکروتیر به عنوان تابع اصلی فرآیند تعریف شده است. بر اساس نتایج مدل‌سازی‌های اولیه انجام شده و مقایسه آنها با نتایج آخرین تحقیق انجام شده در این زمینه [۲۳]، هر یک از این ۵ متغیر در ۵ سطح، مطابق جدول ۲، تعریف شده‌اند. متغیر غیر کنترلی، ولتاژ اعمالی است که به صورت ثابت و مقدار ۲۰۰ ولت فرض شده است. برای تعریف چیدمان آزمایش‌ها از یک آرایه متعامد $L_{25}(5^5)$ ، مطابق جدول ۳ استفاده شده است.

جدول ۲- متغیرهای هندسی میکروتیر و سطوح تعریف شده

متغیر	L (μm)	b (μm)	S (μm)	t (μm)	h (μm)
سطح ۱	3600	50	140	35	40
سطح ۲	5300	62.5	180	38.75	48.75
سطح ۳	7000	75	220	42.5	57.5
سطح ۴	8700	87.5	260	46.25	66.25
سطح ۵	10400	100	300	50	75

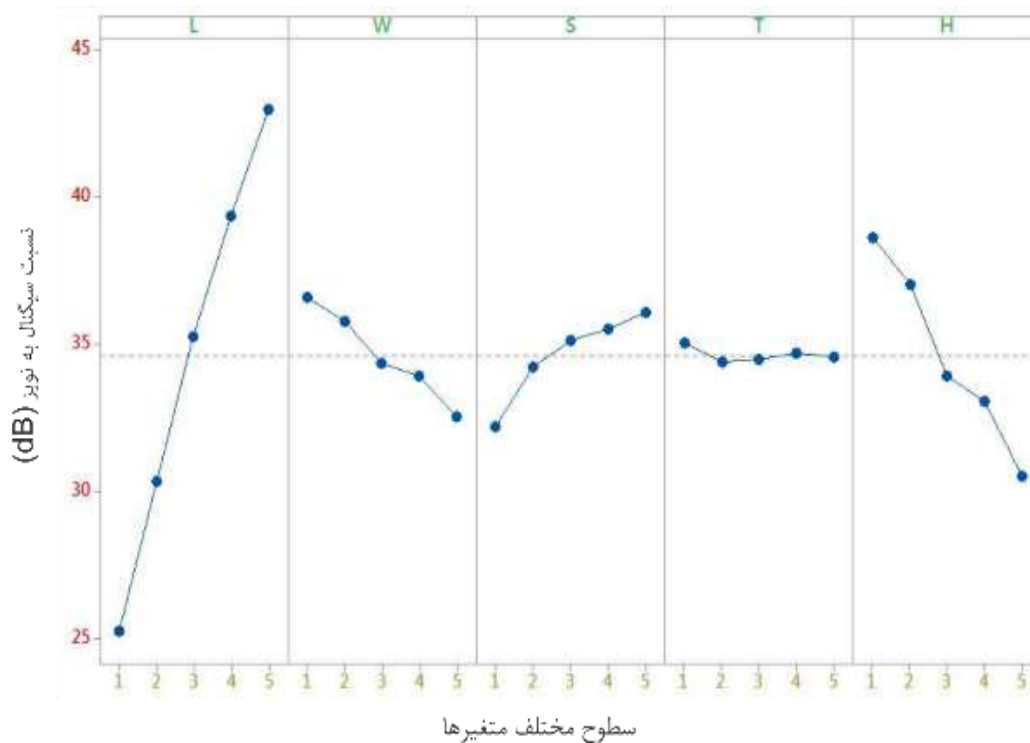
هر چه مقدار جابه‌جایی خارج از صفحه میکروتیر پیزوالکتریک بیشتر باشد، نشان دهنده عملکرد مطلوبتر آن است؛ بنابراین در تحلیل ضرایب سیگنال به نویز حالت بزرگتر بهتر، انتخاب شده است. برای محاسبه ضرایب سیگنال به نویز (S/N)، از رابطه ۱ استفاده می‌شود [۲۷]:

$$\frac{S}{N} = -10 \log_{10} \left[\frac{(\sum_{i=1}^n (\frac{1}{y_i^2}))}{n} \right] \quad (1)$$

¹ Analysis of Variance

جدول ۳- آرایه متعامد L_{25}

نسبت سیگنال به نویز (دسی بل)	جابه‌جایی خارج صفحه (میکرومتر)	متغیرهای هندسی					شماره آزمایش
		h	t	S	b	L	
29.94	31.42	1	1	1	1	1	1
27.28	23.12	2	2	2	2	1	2
24.95	17.68	3	3	3	3	1	3
22.88	13.93	4	4	4	4	1	4
21.02	11.246	5	5	5	5	1	5
30.76	34.52	4	3	2	1	2	6
28.70	27.22	5	4	3	2	2	7
34.02	50.23	1	5	4	3	2	8
34.21	51.36	2	1	5	4	2	9
23.87	15.61	3	2	1	5	2	10
39.03	89.48	2	5	3	1	3	11
37.57	75.62	3	1	4	2	3	12
35.35	58.53	4	2	5	3	3	13
27.09	22.618	5	3	1	4	3	14
37.16	72.12	1	4	2	5	3	15
38.17	80.97	5	2	4	1	4	16
44.79	173.55	1	3	5	2	4	17
39.68	96.39	2	4	1	3	4	18
38.25	81.76	3	5	2	4	4	19
35.78	61.54	4	1	3	5	4	20
44.94	176.55	3	4	5	1	5	21
40.36	104.24	4	5	1	2	5	22
37.59	75.74	5	1	2	3	5	23
47.13	227.16	1	2	3	4	5	24
44.75	172.80	2	3	4	5	5	25



شکل ۳- تاثیر سطوح مختلف متغیرهای هندسی میکروتیر بر ضریب S/N

میکرومتر (سطح ۵)، ضخامت فلنج ۳۵ میکرومتر (سطح ۱) و عمق جان تیر ۷۵ میکرومتر (سطح ۱) می باشد.

۴- تحلیل واریانس ضرایب سیگنال به نویز

برای تعیین ترتیب اهمیت تاثیر پارامترهای مورد مطالعه بر جابه جایی خارج از صفحه نوک میکروتیر، از تحلیل واریانس ضرایب سیگنال به نویز استفاده شد. نتایج تحلیل واریانس در جدول ۵ آورده شده است. در این جدول f درجه آزادی، ss مجموع مربعات و V واریانس می باشد. هرچه مقدار F (نسبت واریانس متغیر به واریانس خطا) و $P_p(\%)$ (درصد کل واریانس هر پارامتر) بیشتر باشد، نشان دهنده تاثیر بیشتر آن پارامتر بر جابه جایی خارج از صفحه نوک میکروتیر است. بنابراین بر اساس نتایج تحلیل واریانس ضرایب سیگنال به نویز، متغیرهای هندسی میکروتیر به ترتیب اهمیت تاثیر عبارتند از: طول میکروتیر (L)، عمق جان تیر (h)، ضخامت جان تیر (b)، پهنای فلنج (S) و ضخامت فلنج (t). در بین متغیرهای مورد مطالعه L و h بیشترین تاثیر را بر جابه جایی

جدول ۴- میانگین ضرایب سیگنال به نویز برای سطوح مختلف متغیرها

متغیرها	میانگین ضرایب سیگنال به نویز				
	h	t	S	b	L
سطح ۱	38.61	35.02	32.19	36.57	25.22
سطح ۲	36.40	34.36	34.21	35.74	30.31
سطح ۳	33.92	34.48	35.12	34.32	35.24
سطح ۴	33.03	34.68	35.48	33.92	39.33
سطح ۵	30.52	34.54	36.07	32.52	42.95

بر اساس نتایج مذکور، ترکیب بهینه سطوح مختلف فرآیند برای ایجاد بیشترین جابه جایی خارج از صفحه به ترتیب عبارتند از: طول ۱۰/۴ میلیمتر (سطح ۵)، ضخامت جان تیر ۵۰ میکرومتر (سطح ۱)، پهنای فلنج ۳۰۰

مدلسازی ارائه شده در این مقاله را به اثبات می رساند. از تعداد ۲۵ مدلسازی انجام شده، درصد خطای نتایج ۲۰ مدلسازی نسبت به نتایج آزمایشهای تجربی، کمتر از ۵ درصد و درصد خطای ۵ مدلسازی بین ۵ تا ۲۰ درصد بوده است. برای محاسبه جابه‌جایی خارج از صفحه میکروتیرها، الکتروود پایینی به عنوان زمین در نظر گرفته شد و به الکتروود بالایی ولتاژهای ۱۰ تا ۲۰۰ ولت اعمال شد. بنابراین میدان الکتریکی اعمال شده در محدوده ۰/۱ تا ۲ $V/\mu m$ قرار داشت.

جدول ۵- آنالیز واریانس ضرایب سیگنال به نویز

پارامتر	f	ss	V	F	$P_p(\%)$
L	4	995.32	248.83	73.29	75.78
b	4	50.33	12.58	3.71	3.84
S	4	45.73	11.43	3.37	3.48
t	4	1.31	0.33	0.10	0.10
h	4	207.19	51.80	15.26	15.77
خطا	4	13.58	3.40	-	1.03
کل	24	1313.48	-	-	100

جدول ۶- نتایج آزمایش تصدیق

شرایط بهینه		سطح	نسبت سیگنال به نویز (دسی بل)
آزمایش	پیش بینی		
1,1,5,1,5	1,1,5,1,5		47.13
			50.77

جدول ۷- پارامترهای ابعادی میکروتیرهای مدل شده

میکروتیر	L (mm)	b (μm)	s (μm)	t (μm)	h (μm)
W1	7.7	61	139	39	100
W2	3.8	52	208	36	100
W3	10.4	49	149	35	100
W4	5.8	62	144	42	100

خارج از صفحه دارند. b و s تاثیر کمتر و تاثیر t تقریباً قابل چشم پوشی است.

۵- آزمایش تصدیق

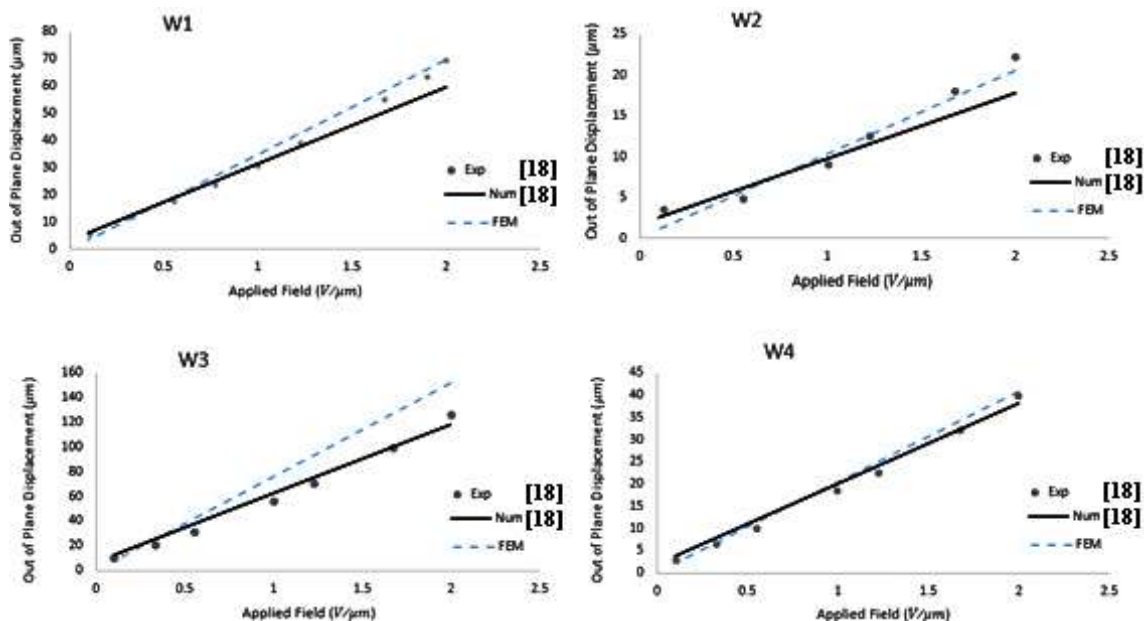
آخرین مرحله در استفاده از روش تاگوچی، انجام آزمایش تصدیق برای سنجش درستی نتایج حاصل می باشد. در این آزمایش مقادیر متغیرهای هندسی میکروتیر T شکل پیژو الکتریکی بر روی سطوح بهینه تنظیم شد و جابه‌جایی خارج از صفحه ایجاد شده در نوک میکروتیر اندازه‌گیری شد. با انجام این آزمایش مقدار جابه‌جایی خارج از صفحه برابر $296/3$ میکرومتر در نوک میکروتیر ایجاد شد که ۴ برابر متوسط نتایج شبیه سازی‌های انجام شده می باشد. ضریب S/N این آزمایش (dB) $50/77$ می باشد که در مقایسه با میانگین ضرایب S/N آزمایشات انجام شده، ضریب S/N $16/16$ دسی بل بهبود یافته است. مقدار سیگنال به نویز برای سطح های بهینه (η_{opt}) با استفاده از رابطه ی زیر قابل پیش بینی است [۲۷]:

$$\eta_{opt} = \eta_m + \sum_{i=1}^p (\bar{\eta}_i - \eta_m) \quad (2)$$

در رابطه بالا، η_m میانگین کل ضرایب سیگنال به نویز آزمایش‌های انجام شده، p تعداد پارامترهای مورد مطالعه و $\bar{\eta}_i$ میانگین مقدار ضریب سیگنال به نویز در سطح بهینه هر پارامتر می باشد. مقدار پیش بینی شده ضریب سیگنال به نویز برای آزمایش تصدیق و مقدار محاسبه شده با استفاده از نتیجه شبیه سازی به روش المان محدود در جدول ۶ آورده شده است، مشاهده می شود که مطابقت خوبی بین مقدار پیش بینی شده و نتیجه حاصل از آزمایش تصدیق وجود دارد.

۶- اعتبار سنجی مدل

برای ارزیابی اعتبار مدل ارائه شده، جابه‌جایی خارج از صفحه چهار میکروتیر از جنس PZT-4 با مشخصات مندرج در جدول ۷ مدلسازی شد و مطابق شکل ۴، نتایج حاصل با نتایج تجربی و مدلسازی عددی ارائه شده در مرجع [۲۳] مقایسه شد. مشاهده می شود که مطابقت بسیار خوبی بین نتایج حاصل از مدلسازی به روش المان محدود و نتایج تجربی و مدلسازی عددی وجود دارد که این امر اعتبار



شکل ۴- جابه‌جایی خارج از صفحه میکروتیرهای W1 تا W4 بر حسب میدان الکتریکی اعمال شده

۷- نتیجه‌گیری

در این تحقیق جابه‌جایی خارج از صفحه یک میکروتیر بیزوالکتریکی با سطح مقطع T شکل به روش المان محدود مدل‌سازی شد. با استفاده از روش تاگوچی، تأثیر پارامترهای هندسی میکروتیر مورد نظر بر روی جابه‌جایی خارج از صفحه نوک آن بررسی شد. مشخص شد که سطح بهینه متغیرهای هندسی میکروتیر برای دستیابی به حداکثر جابه‌جایی خارج از صفحه، در محدوده مدل‌سازی‌های انجام شده، عبارتند از: طول ۱۰/۴ میلی‌متر، ضخامت جان تیر ۵۰ میکرومتر، پهنای فلنج ۳۰۰ میکرومتر، ضخامت فلنج ۳۵ میکرومتر و عمق جان تیر ۷۵ میکرومتر می‌باشد. با تحلیل واریانس ضرایب S/N، اهمیت تأثیر متغیرهای هندسی بر جابه‌جایی خارج از صفحه نوک میکروتیر نیز بررسی شد. معلوم شد پارامتر هندسی موثر بر جابه‌جایی خارج از صفحه میکروتیر به ترتیب اهمیت تأثیر عبارتند از: طول تیر، عمق جان تیر، ضخامت جان تیر، پهنای فلنج و ضخامت فلنج.

۸- مراجع

[2] Lee JH, *et al.* (2005) Immunoassay of prostate-specific antigen (PSA) using resonant frequency shift of piezoelectric nanomechanical microcantilever. *Biosens Bioelectron* 20(10): 2157-2162.

[3] Lee C, Itoh T, Suga T (1996) Micromachined piezoelectric force sensors based on PZT thin films. *IEEE T Ultrason Ferr* 43(4): 553-559.

[4] Mahameed R, *et al.* (2008) Dual-beam actuation of piezoelectric AlN RF MEMS switches monolithically integrated with AlN contour-mode resonators. *J Micromech Microeng* 18(10): 105011.

[۵] طهماسبی پور م، سنگ چاپ م، طوفان م (۱۳۹۵) شبیه‌سازی یک سوئیچ میکروالکترومکانیکی بر پایه کانتیلور بیزوالکتریکی. کنفرانس بین‌المللی تحقیقات بنیادین در مهندسی برق، تهران.

[۶] طهماسبی پور م، وفایی ع (۱۳۹۵) مدل‌سازی شتاب‌سنج بیزوالکتریکی MEMS به روش المان محدود. بیست و چهارمین کنفرانس مهندسی برق ایران، شیراز.

[7] Tahmasebipour M, Vafaei A (2017) A highly sensitive three axis piezoelectric microaccelerometer for high bandwidth applications. *Micro Nano* 9(2): 111-120.

[8] Tani M, *et al.* (2007) A two-axis piezoelectric tilting micromirror with a newly developed PZT-meandering actuator. in *Micro Electro Mechanical Systems, MEMS. IEEE 20th International Conference on*. 2007. IEEE.

[1] Castille C, Dufour I, Lucat C (2010) Longitudinal vibration mode of piezoelectric thick-film cantilever-based sensors in liquid media. *Appl Phys Lett* 96(15): 154102.

- [18] Itoh T, Lee C, Suga T (1996) Deflection detection and feedback actuation using a self-excited piezoelectric Pb (Zr, Ti) O₃ microcantilever for dynamic scanning force microscopy. *Appl Phys Lett* 69(14): 2036-2038.
- [19] Wang QM, Cross LE (1999) Tip deflection and blocking force of soft PZT-based cantilever RAINBOW actuators. *J Am Ceram Soc* 82(1): 103-110.
- [20] Shi Z, Xiang H, Spencer Jr B (2006) Exact analysis of multi-layer piezoelectric/composite cantilevers. *Smart Mater Struct* 15(5): 1447.
- [21] Heinonen E, Juuti J, Jantunen H (2007) Characteristics of piezoelectric cantilevers embedded in LTCC. *J Eur Ceram Soc* 27(13): 4135-4138.
- [22] Palosaari J, *et al.* (2009) Electromechanical performance of structurally graded monolithic piezoelectric actuator. *J Electroceram* 22(1-3): 156-162.
- [23] Mateti K, *et al.* (2013) Fabrication and characterization of micromachined piezoelectric T-beam actuators. *J Microelectromech S* 22(1): 163-169.
- [24] Kommepalli H, *et al.* (2011) Piezoelectric T-beam actuators. *J Mech Design* 133(6): 061003.
- [25] Roy RK (2010) A primer on the Taguchi method. *Society of Manufacturing Engineers*.
- [26] Thomas A, Antony J (2005) A comparative analysis of the Taguchi and Shainin DOE techniques in an aerospace environment. *Int J Prod Perform Manag* 54(8): 658-678.
- [27] Antony J, Jiju Antony F (2001) Teaching the Taguchi method to industrial engineers. *Work Stud* 50(4): 141-149.
- [9] Li Y, *et al.* (2006) Track-following control with active vibration damping of a PZT-actuated suspension dual-stage servo system. *J Dyn Syst-T ASME* 128(3): 568-576.
- [10] Erturk A, Inman DJ (2009) An experimentally validated bimorph cantilever model for piezoelectric energy harvesting from base excitations. *Smart Mater Struct* 18(2): 025009.
- [۱۱] طهماسبی پور م، سنگ چاپ م (۱۳۹۵) بهینه سازی یک سیستم الکترومکانیکی ذخیره انرژی بر پایه کانتیلور پیزوالکتریک. کنفرانس بین المللی تحقیقات بنیادین در مهندسی برق، تهران.
- [۱۲] حسینی ر و فاتحی ناراب ه (۱۳۹۶) برداشت انرژی ارتعاشی با استفاده از تیر یکسر درگیر با دو لایه پیزوالکتریک. *مجله علمی پژوهشی مکانیک سازه‌ها و سازه‌ها* ۹-۱: ۷(۱).
- [13] Furukawa T, Ishida K, Fukada E (1979) Piezoelectric properties in the composite systems of polymers and PZT ceramics. *J Appl Phys* 50(7): 4904-4912.
- [14] Ajitsaria J, *et al.* (2007) Modeling and analysis of a bimorph piezoelectric cantilever beam for voltage generation. *Smart Mater Struct* 16(2): 447.
- [15] Suo Z, *et al.* (1992) Fracture mechanics for piezoelectric ceramics. *J Mech Phys Solids* 40(4): 739-765.
- [16] Kogan L, Hui CY, Molkov V (1996) Stress and induction field of a spheroidal inclusion or a penny-shaped crack in a transversely isotropic piezoelectric material. *Int J Solids Struct* 33(19):2719-2737.
- [17] Minne S, Manalis S, Quate C (1995) Parallel atomic force microscopy using cantilevers with integrated piezoresistive sensors and integrated piezoelectric actuators. *Appl Phys Lett* 67(26): 3918-3920.