



تحلیل ناپایداری استاتیکی و دینامیکی پولین نانومحرک‌های دو سر گیردار نیمه متأثر: تأثیر الکترو دینامیک

امین‌رضا نقره‌آبادی^۱، امیر حق‌پرست^۱، محمد قلم‌باز^{۲*}

^۱ دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید چمران، اهواز، ایران.
^۲ دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد دزفول، دزفول، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۵ شهریور ۱۳۹۵
بازنگری: ۲۰ دی ۱۳۹۵
پذیرش: ۳ بهمن ۱۳۹۵
ارائه آنلاین: ۹ بهمن ۱۳۹۵

کلمات کلیدی:

نانوتیر
دو سرگیردار
نیمه‌متأثر
نظریه تنش مزدوج اصلاح‌شده

چکیده: تحقیقات بسیار زیادی پیرامون مدلسازی ناپایداری‌های سیستم‌های میکرو/نانو الکترومکانیکی با اندازه یکسان دو الکترو دینامیک متحرک و زیرلایه تاکنون انجام شده است، ولی پژوهشی که مدل‌سازی ناپایداری پولین استاتیکی و دینامیکی میکرو/نانومحرک‌ها را با وجود الکترو دینامیک کوتاه‌تر (نیمه‌متأثر) و با در نظر گرفتن اثرات ابعاد کوچک مورد بررسی قرار بدهد یافت نشده است. در پژوهش حاضر، رفتار استاتیکی و دینامیکی میکرو/نانوتیر دوسرگیردار نیمه‌متأثر مورد بررسی قرار گرفته و اثرات ناشی از جابه‌جایی موقعیت و طول الکترو دینامیک مطالعه شده است. معادلات حرکت غیرخطی اویلر-برنولی و شرایط مرزی متناظر با آن، مبتنی بر تئوری غیر کلاسیک تنش مزدوج اصلاح‌شده به‌دست‌آمده‌اند. برای حل معادلات دیفرانسیل از روش حل عددی المان محدود بهره برده شده است. دقت روش المان محدود مورد استفاده از طریق مقایسه با نتایج به‌دست‌آمده پژوهش‌های پیشین اعتبارسنجی شده است و تطابق خوبی بین نتایج مشاهده شد. نتایج نشان‌دهنده این هستند که با کاهش طول الکترو دینامیک، مقدار ولتاژ و نیروی موئینگی نهایی افزایش می‌یابد. کاهش طول الکترو دینامیک باعث کاهش اندکی در جابه‌جایی نهایی می‌شود. در نهایت، یک پارامتر جدید متعادل‌کننده اثر اندازه-نیروی موئینگی برای نانوتیرها معرفی خواهد شد که باعث تغییر رفتار نانوتیر می‌گردد.

۱- مقدمه

پیشرفت خیره‌کننده نانو تکنولوژی، فرصت توسعه سامانه‌های بسیار دقیق و با عملکرد بالا در مقیاس میکرو و نانو را ایجاد نمود. از این رو، نانو فناوری به دلیل کاربردهای مکانیکی، الکترونیکی، حرارتی و الکترو-مکانیکی، به موضوع تحقیقی گسترده‌ای تبدیل شد. این ویژگی‌های منحصر به فرد، عصر جدیدی را در علم و فناوری ایجاد نمود و باعث ایجاد انگیزه برای بسیاری از محققین در تمامی علوم مانند شیمی، فیزیک، علم مواد و دیگر علوم طبیعت برای طراحی و ساخت آن‌ها شد. روند در حال رشد سالیانه انتشار مقالات مهندسی، علمی و سرمایه‌گذاری‌های عظیم دولت‌ها و مؤسسه‌های خصوصی، ادعای چنین پیشرفتی را در عرصه نانو فناوری اثبات می‌کنند. نانو فناوری به مشاهده، اندازه‌گیری، کنترل، ساخت و راه‌اندازی سامانه‌ها در ابعاد کوچک‌تر از ۱۰۰ نانومتر به‌منظور تولید سامانه‌های دقیق‌تر و سریع‌تر به همراه مصرف کمتر و ساختار ساده‌تر اطلاق می‌شود.

اخیراً، سامانه‌های میکرو/نانو الکترومکانیکی^۱ به‌عنوان یک فناوری جدید در شاخه‌های مختلف مانند مکانیک، حرارت، شیمیایی، نورانی، مغناطیسی، الکترونیکی و غیره کاربردهای بسیار متنوعی پیدا کرده است. از میکرو/نانو سامانه‌های الکترومکانیکی به‌طور گسترده در ابزارهایی مانند نانو انبر

مویی [۱-۳]، حسگرهای بسیار حساس [۴ و ۵]، رزوناتورها [۶]، کلیدهای الکترواستاتیک [۷ و ۸]، حافظه‌های تصادفی [۹]، محرک‌ها و حسگرها [۱۰ و ۱۱] استفاده شده است.

میکرو/نانو سامانه‌های الکترومکانیکی به سبب سادگی ساختارشان، تنها به تعداد کم اجزای مکانیکی و سطوح ولتاژ پایین برای تحریک نیازمندند [۱۲]. در چنین ابزارهایی، یک تیر/صفحه منعطف و متحرک در بالای یک تیر/صفحه ثابت معلق است و یک اختلاف ولتاژ میان آن‌ها اعمال می‌شود. اعمال اختلاف ولتاژ بین دو الکترو دینامیک باعث تغییر شکل الکترو دینامیک و انحراف آن به سوی الکترو دینامیک ثابت (زیرلایه) می‌شود. تا زمانی که میان نیروهای الکترواستاتیک^۳ و نیروی بازگرداننده الاستیک در میکرو/نانوساختار تعادل وجود دارد، هر دو آن‌ها با افزایش ولتاژ الکترواستاتیک، افزایش می‌یابند. زمانی که ولتاژ به مقدار بحرانی خود می‌رسد، ناپایداری پولین^۵ رخ می‌دهد. پولین زمانی اتفاق می‌افتد که نیروی بازگرداننده الاستیک با نیروی الکترواستاتیک در تعادل نباشد. افزایش بیشتر ولتاژ باعث می‌شود که ساختار دچار جابه‌جایی زیادی شده و الکترو دینامیک بر روی الکترو دینامیک زیرلایه سقوط می‌کند و سامانه ناپایدار می‌شود. به ولتاژ و انحراف متناظر با این پدیده، به

2 Resonators
3 Random Access Memory
4 Electrostatic Force
5 Pull-in Instability

1 Micro/Nano Electromechanically

نویسنده عهده‌دار مکاتبات: m.ghalambaz@iaud.ac.ir

شرایط، پولین دینامیکی خوانده می‌شود. قابل ذکر است که در تحقیقات پیشین در مورد پولین استاتیکی [۲۷-۲۴] به‌طور واضح از محاسبات پولین شبه استاتیکی نام برده شده است. برای عملکرد بهتر، ضروری است که ولتاژ اعمالی برای مواردی مانند میکروکلیدها، صابرها و حسگرهای فشار مینی بر ولتاژ پولین به شکل تابع مرحله‌ای محاسبه شود؛ زیرا که اثر اینرسی تیر تغییرشکل یافته باعث می‌شود ولتاژ پولین محاسبه شده کمتر از ولتاژ پولین شبه استاتیکی شود. یزدان‌پناهی و همکاران [۲۸] با استفاده از یک مدل پیوسته، معادلات حاکم بر نانو تیر دو سرگیردار را به دست آوردند. آن‌ها با استفاده از روش‌های حل تحلیلی ادومین و حل عددی اقدام به بررسی رفتار پولین محرک‌ها نمودند. نیلسون و بارباستیس [۲۹] میکرومحرک‌های الکترواستاتیکی را با استفاده از مدل دو صفحه موازی گسترده تحلیل کردند. الاتا و بمبرگر [۳۰] یک سامانه چند درجه آزادی را با استفاده از مدل پارامتر گسترده برای به دست آوردن ولتاژ پولین در نظر گرفتند. در هر دو [۲۹ و ۳۰] به این نتیجه رسیده شد که برای مدل دو صفحه موازی گسترده نسبت میان ولتاژ استاتیکی و دینامیکی حدوداً برابر با ۹۱/۹ درصد است. ناپایداری دینامیکی به‌صورت تجربی توسط ناتانسون و همکاران [۳۱] بررسی شده است. چاترجی و پوهیت [۳۲] رفتار پولین استاتیکی و دینامیکی میکروتیرهای یک سر درگیر غیرخطی را مورد بررسی قرار دادند. مقیمی‌زند و احمدیان [۳۳] با استفاده از روش تحلیلی هموتویی، روشی را برای تحلیل ناپایداری پولین دینامیکی میکروتیرها ارائه نمودند. یانگ و همکاران [۳۴] رفتار ارتعاشی و پولین دینامیکی میکروتیرهای منحنی شکل را تحلیل کردند. وانگ و همکاران [۳۵] بسامد خنثی و ناپایداری میکروتیرهای چندین لایه‌ای تحت تأثیر نیروی الکترواستاتیک را بررسی کردند. آن‌ها اثر تنش پسماند و پارامترهای هندسه را بر رفتار میکروتیرها مورد آزمایش قرار دادند. پژوهش حاضر در درجه اول به محاسبات دقیق پارامترهای پولین دینامیکی پرداخته است و با انجام مقایسه با حالت استاتیکی و تحلیل نتایج، ضرورت محاسبه دینامیکی پارامترهای پولین اثبات می‌شود.

نیروی موئینگی^{۱۱} زمانی میان دو جسم رخ می‌دهد که سیالی میان آن دو نفوذ کند [۳۶]. نشان داده شده است که در صورت وجود رطوبت بسیار پایین در محیط اطراف، نیروی موئینگی می‌تواند پدیدار شود [۳۷]. نیروی موئینگی به‌اندازه‌ای بزرگ است که می‌تواند باعث سقوط الکترومحرک بر روی پایه شود. لذا بررسی شرایط ناپایداری نانو تیرهای تحت تأثیر این نیرو با اهمیت است [۳۸]. بررسی ناپایداری مکانیکی و پدیده پولین نانو تیرها با در نظر گرفتن نیروی موئینگی توسط مسترانگلو و اچسو [۳۹] انجام شده است. اوکاد و یونیس [۴۰] رفتار استاتیکی و ناپایداری تیر دو سر درگیر را تحت نیروی موئینگی بررسی نمودند. یزدان‌پناهی و همکاران [۴۱] به تحلیل تأثیر نیروی موئینگی بر انحراف و ناپایداری پولین میکرومحرک‌های الکترواستاتیکی در حضور لایه دی‌الکتریک پرداختند. آن‌ها با معرفی پارامتر لایه دی‌الکتریک متعادل‌کننده، به اهمیت آن در طراحی میکروتیرها در حضور نیروی موئینگی

ترتیب ولتاژ پولین^۱ و انحراف پولین^۲ گفته می‌شود. از کاربردهای این پدیده می‌توان به صابرها^۳ [۱۳ و ۱۴] و یا حسگرهای فشار^۴ [۱۵ و ۱۶] اشاره کرد که در محدوده ایمن و قبل از پولین فعالیت می‌کنند، درحالی‌که کلیدهای رادیو فرکانسی/نوری^۵ [۱۷ و ۱۸] در طول پدیده پولین به‌طور متناوب قطع و وصل می‌شوند. در تمامی کاربردهای مذکور، لازم است ولتاژ بحرانی پولین قبل از استفاده به‌طور دقیق محاسبه شود و از این‌رو پارامتری مهم برای طراحان است.

تحقیقات بسیاری پیرامون پدیده پولین برای انواع گوناگونی از حسگرها و محرک‌ها انجام شده است [۱۹]. در این تحقیقات، در ابتدا پارامترهای پولین بدون در نظر گرفتن تغییرشکل دینامیکی الکترومحرک زده شدند که به آن‌ها پارامترهای پولین استاتیکی^۶ گفته می‌شود. در پژوهش‌های بعدی، برای نمود واقعی‌تر، ولتاژ اعمالی در گونه‌های متفاوت ولتاژ DC (ولتاژ ورودی مرحله‌ای)، ولتاژ AC (ولتاژ ورودی هارمونیک مانند) و یا ترکیبی از ولتاژ DC/AC به‌منظور ایجاد حالت دینامیکی تغییرشکل الکترومحرک و ارائه محاسبات دقیق‌تر ولتاژ پولین در نظر گرفته شد.

برای پولین استاتیکی، در پژوهش‌های ابتدایی از مدل یک‌بعدی گسترده^۷ [۲۲-۲۰] برای تقریب رفتارهای تیرها/صفحات به‌منظور تخمین پارامترهای پولین استفاده شد. پامیدیقانتام و همکاران [۲۳] با استفاده از مدل ساده جرم و فنر، پارامترهای پولین نانو تیرهای یک سر و دو سرگیردار را به‌دست آوردند. آن‌ها به منظور کاهش خطای محاسباتی اثرات میدان لبه، کشش دومحوری، سختی غیرخطی و توزیع مجدد الکتروسیسته را در نظر گرفتند. در مقایسه با پژوهش‌های تجربی، تغییر شکل تیر/صفحه با مدل گسترده تشخیص داده شد، لذا تعدادی از محققین مبنی بر مدل‌های پیوسته [۲۴ و ۲۵] و یا مدل‌های اجزا محدود^۸ [۲۶ و ۲۷] به نتیجه‌گیری پرداختند. علاوه بر تحقیقات بالا و پیرامون پولین استاتیکی، در تحقیقات دیگری [۲۸ و ۲۹] پی برده شد که در اغلب کاربردهای عملی ابزارهای الکترواستاتیکی که پیش‌تر ذکر شده‌اند، پیش از آن‌که تیر انحراف کند، ولتاژ بین دو الکترومحرک اعمال می‌شود. این بدین معناست که ولتاژ به‌صورت آنی (تابع مرحله‌ای^۹) اعمال می‌شود و این ولتاژ، پولین دینامیکی^{۱۰} نامیده می‌شود. به‌بیان‌دیگر در صورتی که نرخ تغییر ولتاژ قابل صرف‌نظر کردن است، اینرسی اثری بر رفتار سامانه ندارد. به این شرایط همان‌طور که گفته شد، ناپایداری پولین استاتیکی اطلاق می‌شود. در سوی دیگر زمانی که ولتاژ به‌طور ناگهانی اعمال شود و یا نرخ تغییر ولتاژ قابل توجه باشد، اینرسی تأثیر مهمی بر رفتار سامانه داشته و ناپایداری متناظر با این

- 1 Pull-in Voltage
- 2 Pull-in Deflection
- 3 Microphones
- 4 Pressure Sensors
- 5 RF/Optical Switches
- 6 Static Pull-in
- 7 1D Lumped Model
- 8 Finite Elements Models
- 9 Step Function
- 10 Dynamic Pull-in

اشاره کردند.

بین سختی به دست آمده با نظریه‌های تنش مزدوج کلاسیک و اصلاح شده قابل توجه است. یانگ و همکاران [۵۲] به بررسی و تحلیل ناپایداری پولین نانولکیده‌های تحت تأثیر نیروی الکترواستاتیک و تعاملات بین مولکولی در حوزه نظریه الاستیسیته غیرموضعی ارینگن پرداختند. آن‌ها یک مدل بارگذاری گسترده و خطی را پیشنهاد نمودند و از آن برای خطی‌سازی نیروهای الکترواستاتیک و بین مولکولی استفاده کردند و بدین صورت معادله دیفرانسیل غیرخطی را به منظور به دست آوردن یک راه حل فرم-بسته برای نانوتیرهای یک سر و دو سرگیردار ساده نمودند. آن‌ها پی بردند که با افزایش ضریب مقیاس کوچک، ولتاژ پولین نانوتیر یک سرگیردار افزایش و این پارامتر برای نانوتیر دو سرگیردار کاهش می‌یابد. طادی‌بنی و همکاران [۵۳] رفتار پولین استاتیکی سه نمونه از میکروتیرهای تحت اثر نیروهای بین مولکولی و شرایط مرزی الاستیک را تحلیل نمودند. آن‌ها با استفاده از نظریه تنش مزدوج اصلاح شده، اثرات اندازه را بر ناپایداری نانو ساختارها مورد آزمایش قرار دادند. رهایی فرد و همکاران [۵۴] رفتار دینامیکی میکروتیرهای یک سرگیردار تحت تأثیر نیروی الکترواستاتیک مبنی را بر نظریه تنش مزدوج بررسی و نتایج به دست آمده را با نتایج نظریه کلاسیک مقایسه نمودند. قربان پور آرانی [۵۵] با استفاده از نظریه غیر کلاسیک غیر موضعی به بررسی ناپایداری پولین نانوتیرهای دو سرگیردار ساخته شده از نیتريد بور و تحت تأثیر نیروهای الکترواستاتیک و کاسیمیر پرداختند. آن‌ها در تحقیقی دیگر [۵۶]، اثرات نیروهای الکترواستاتیک و واندروالس را بر نانوتیرهای یک سر و دو سرگیردار با جنس و نظریه حل مشابه [۵۵]، جهت به دست آوردن پارامترهای پولین مورد بررسی قرار دادند. در این دو تحقیق [۵۵ و ۵۶] از روش‌های تجزیه ادومین اصلاح شده^۹ و دیفرانسیل مربعی^{۱۰} به منظور گسسته‌سازی معادلات حاکم غیرخطی استفاده شده است.

برای نانوتیرهای با اجزای متحرک، غیرخطی بودن معادلات حرکت ناشی از کشش میان صفحه‌ای، اثر حائز اهمیتی بر رفتار مکانیکی تیر است که باید در روابط استخراج شده در نظر گرفته شود. پژوهش‌های موجود نشان می‌دهد که کشش میان صفحه‌ای بر رفتار استاتیکی و دینامیکی نانوتیرها تأثیر قابل توجهی دارد [۵۴ و ۵۷]. عبدالرحمان و همکاران [۵۷] با استفاده از یک مدل غیرخطی، اثر نیروی محوری بر ناپایداری میکروتیرهای تحت تأثیر نیروی الکترواستاتیک را بررسی نمودند. آن‌ها گزارش دادند که افزایش نیروی محوری، نیروی الکترواستاتیک و اثرات ناشی از انحراف میکروتیر را افزایش می‌دهد.

اصلاح و توسعه انواع مدل‌های نانوتیر به دلیل در بر گرفتن تمامی حالت‌های ممکن و بررسی آسان‌تر و همچنین بهینه‌سازی شرایط موجود در گذشته، بسیار مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. دادگور و همکاران [۵۸] با اصلاح مدل نانوتیر یک سرگیردار، ناپایداری پولین و اثرات نیروهای اعمالی بر آن را بررسی نمودند. آن‌ها بر مبنای نظریه تنش مزدوج

بسیاری از محققین نشان دادند در ساختارهایی به ابعاد میکرو و نانو، مواد وابستگی شدیدی به اندازه در رفتار تغییر شکلی خود دارند [۴۴-۴۲]. رفتار وابسته به اندازه، زمانی یک ویژگی ذاتی ماده برای یک تیر است که خصیصه اندازه آن مانند ضخامت و یا قطر نزدیک به پارامتر مقیاس طول ماده داخلی باشد [۴۵]. از آنجایی که نظریه پیوسته کلاسیک توانایی بررسی اثر مقیاس کوچک و یا رفتار وابسته به اندازه ساختار و اجزا در ابعاد میکرو/ نانو را دارا نیست، اخیراً نظریه‌های پیوسته غیر کلاسیک مانند تنش مزدوج اصلاح شده^۱ [۴۶] و نظریه‌های غیر موضعی^۲ [۴۷ و ۴۸] برای شبیه‌سازی نانو ساختارها مورد توجه قرار گرفته‌اند. در تحقیقات پیشین نیز تفاوت بین نتایج تجربی و نظریه پیوسته کلاسیک^۳ اغلب به سبب در نظر نگرفتن اثرات مقیاس کوچک^۴ (اندازه) است. نظریه تنش مزدوج یکی از نظریه‌های پیوسته غیر کلاسیک شناخته شده است که توانایی در نظر گرفتن اثرات اندازه را دارد. تحقیقات کمی پیرامون بررسی ناپایداری با در نظر گرفتن اثر اندازه انجام شده است. عبدی و همکاران [۴۹] از نظریه تنش مزدوج اصلاح شده برای بررسی اثر اندازه بر ناپایداری پولین استاتیکی تیر یک سرگیردار در حضور نیروهای بین مولکولی با به کارگیری روش‌های تکرار یکنواخت^۵ و اختلال هموتوبی^۶ استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که اثر اندازه می‌تواند پارامترهای پولین را افزایش دهد. نظریه تنش مزدوج کلاسیک یک نظریه مرتبه بالا است که شامل دو پارامتر مقیاس طول ماده مرتبه بالا علاوه بر دو ضریب کلاسیک لامه می‌باشد [۵۰]. برای کاهش پیچیدگی اندازه‌گیری پارامترهای مقیاس طول ماده، یانگ و همکاران [۴۶] نظریه تنش مزدوج اصلاح شده را معرفی نمودند که در آن تانسور تنش مزدوج، متقارن است و برخلاف نظریه تنش مزدوج کلاسیک، تنها یک پارامتر مقیاس طول ماده داخلی دارد. پارک و گائو [۴۳] با به کارگیری نظریه تنش مزدوج اصلاح شده، پاسخ استاتیکی تیر اویلر-برنولی را بررسی کردند و نتایج حاصله از آزمایش خمش تیر پلی‌متریک اپوکسی را تفسیر نمودند. رهایی فرد و همکاران [۵۱] پارامترهای پولین میکروتیر یک سرگیردار را مبنی بر نظریه تنش مزدوج اصلاح شده بررسی کردند و نتایج به دست آمده را با مشاهدات تجربی مقایسه نموده و تطابق خوبی را به دست آوردند. اخیراً، کونگ و همکاران [۴۵] معادله حاکم، شرایط اولیه و مرزی یک تیر اویلر-برنولی^۷ را با استفاده از نظریه تنش مزدوج اصلاح شده و اصل همپتون^۸ به دست آوردند. آن‌ها گزارش نمودند که سختی تیرها وابسته به اندازه است. همچنین، زمانی که خصیصه اندازه تیر نسبت به پارامتر مقیاس طول ماده داخلی قابل مقایسه است، تفاوت

- 1 Modified Couple Stress Theory
- 2 Non-Local Theories
- 3 Classical Continuum Theory
- 4 Small Scale Effects
- 5 Monotonically iterative
- 6 Homotopy perturbation
- 7 Euler-Bernouli
- 8 Hamilton Principle

9 Modified Adomian Decomposition

10 Differential Quadrature Method

$$\chi_{ij} = \frac{1}{2} \left((\nabla \theta)_i + (\nabla \theta)_i^T \right) \quad (5)$$

که θ بردار چرخشی می‌باشد که می‌توان آن را به حوزه جابه‌جایی مرتبط ساخت [۴۶]:

$$\theta_i = \frac{1}{2} \text{curl}(u_i) \quad (6)$$

۲-۲- نانو تیر نیمه متاثر

همان‌گونه که در شکل ۱ نشان داده شده است، ساختار نانوکلیدهای ارائه شده در پژوهش‌های [۵۸-۶۰] را می‌توان به صورت یک نانو تیر دو سرگیردار با طول L ، ارتفاع h ، پهنا b و فاصله اولیه دو الکتروود متحرک و زیرلایه برابر با g_0 مدل‌سازی نمود. نیروی الکترواستاتیک به سبب ولتاژ اعمالی V به مثابه نیروهای بین مولکولی و موئینگی الکتروود متحرک را به سوی پایه منحرف می‌کند. نانو تیر در نظر گرفته شده، ایزوتروپیک^۶ و دارای ضریب مدول یانگ E^y ، چگالی ρ ، مساحت مقطع عرضی A^A و ممان اینرسی^۷ برابر با I است. در این پژوهش‌ها [۵۸-۶۰] برخلاف پژوهش‌های دیگر [۴۲-۴۴]، یک مدل جامع و جدید جهت در نظر گرفتن تمامی حالات ممکن معرفی شده است. در این مدل طول الکتروود زیرلایه از الکتروود متحرک کوتاه‌تر بوده است؛ لذا به عنوان نانوکلیدهای نیمه متاثر^۸ شناخته می‌شوند. در این نوع نانوکلیدها، تنها قسمتی از تیرک (الکتروود متحرک) که در ارتباط با قسمت الکتروود ورودی (الکتروود زیرلایه) قرار دارد با نیروی الکترواستاتیک تحریک و تحت بارگذاری قرار می‌گیرد و در بقیه قسمت‌های موازی با الکتروود متحرک اثر نیروها حذف می‌شوند [۵۸-۶۰]؛ لذا در نظر گرفتن اثرات نیمه متاثر بودن تیرک، برای ایجاد یک مدل‌سازی مبتنی بر واقعیت، در طراحی مهندسی بسیار ملزوم است.

در این مدل، به منظور کنترل مکان و طول الکتروود زیرلایه از تابع هویساید^{۱۱} $H(x)$ استفاده می‌شود.

$$H(x) = H(x - D_1) - H(x - L + D_2) \quad (7)$$

که D_1 فاصله میان تکیه‌گاه چپ تیر از الکتروود زیرلایه و D_2 فاصله میان تکیه‌گاه راست تیر از الکتروود زیرلایه را نشان می‌دهند. تابع پله‌ای هویساید $H(x)$ یا تابع پله‌ای یکه تابعی ناپیوسته و چند ضابطه‌ای است که مقادیرش برای اعداد منفی صفر و برای اعداد نامنفی یک است.

$$H(x) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ 1, & x \geq 0 \end{cases} \quad (8)$$

شکل ۱ نانو تیر دو سرگیردار را نشان می‌دهد. مدل مورد مطالعه در این پژوهش از نوع نانوکلید نیمه متاثر است. در نانو ساختارهای نیمه متاثر، الکتروود

اصلاح شده، مدل جدید را جهت بررسی نمونه‌های زیادی از تیرها، توسعه دادند. وانگ و همکاران [۵۹] با توسعه یک مدل تیر یک سرگیردار برای حالت استاتیکی و در حضور اثرات تنش سطحی و نیروی الکترواستاتیک به بررسی اثر جابه‌جایی و تغییر طول الکتروود زیرلایه پرداختند. هایامیزو و همکاران [۶۰] با بررسی مکان‌های مختلف برای الکتروود زیرلایه، اقدام به بهینه‌سازی عملکرد و ساختار یک نانو تیر کربنی نمودند.

مطالعه ادبیات تحقیق نشان می‌دهد که اثر نیمه متاثر بودن نانو تیرهای دو سرگیر با وجود اثرات ابعاد کوچک تاکنون مورد بررسی قرار نگرفته است. هدف پژوهش حاضر توسعه یک مدل جامع برای نانو تیرهای دو سر درگیر به منظور ایجاد حالتی مبتنی بر واقعیت و با در نظر گرفتن اثرات نیمه متاثر است. با استفاده از مدل توسعه یافته، آثار استاتیکی و دینامیکی ناشی از نیمه متاثر بودن نانو ساختار مورد بررسی، با در نظر گرفتن اثرات ابعاد کوچک و تحت تأثیر نیروهای الکترواستاتیک و موئینگی در حضور اثرات تنش سطحی مطالعه خواهد شد.

۲-۲- مدل سازی نانو تیر

۲-۱- مروری بر نظریه تنش مزدوج اصلاح شده

بنا بر نظریه تنش مزدوج اصلاح شده، چگالی انرژی کرنشی یک مدل پیوسته الاستیکی به صورت زیر است [۴۶]:

$$\bar{u} = \frac{1}{2} (\sigma_{ij} \varepsilon_{ij} + m_{ij} \chi_{ij}), \quad (i, j = 1, 2, 3) \quad (1)$$

که در آن σ_{ij} ، ε_{ij} ، m_{ij} و χ_{ij} به ترتیب بیانگر تانسور تنش، تانسور کرنش، جزء انحرافی تانسور تنش مزدوج^۱ و تانسور انحنای^۲ متقارن هستند. جزء انحرافی تانسور تنش مزدوج به صورت زیر به تانسور انحنای متقارن وابسته است:

$$m_{ij} = 2l^2 \mu \chi_{ij} \quad (2)$$

که μ به مدول برشی اشاره دارد. همچنین l بیانگر پارامتر مقیاس طول است که به نظریه حل توانایی در نظر گرفتن اثرات اندازه را می‌دهد. پارامتر مقیاس طول با استفاده از روش‌های آزمایشگاهی همچون آزمایش پیچش و خمش به دست می‌آید [۶۱]. همچنین تعریف تانسورهای تنش و کرنش به ترتیب در روابط (۳) و (۴) آمده‌اند.

$$\sigma_{ij} = \lambda \text{tr}(\varepsilon_{ij}) \delta_{ij} + 2\mu \varepsilon_{ij} \quad (3)$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left((\nabla u)_i + (\nabla u)_i^T \right) \quad (4)$$

که در روابط فوق λ ، $\text{tr}()$ و δ_{ij} به ترتیب ثابت اول لامه^۳، تریس ماتریس^۴، دلتای کرونگر^۵ می‌باشند. علاوه بر این، تانسور انحنای جز متقارن را می‌توان به صورت زیر نوشت:

- 6 Isotropic
- 7 Young Modulus
- 8 Cross Section Area
- 9 Cross Section Inertia Moment
- 10 Half Effect Nano-Switches
- 11 Heaviside Function

- 1 Deviatoric Part of the Couple Stress Tensor
- 2 Curvature Tensor
- 3 Lamé's Constant
- 4 Trace
- 5 Kronocker Delta

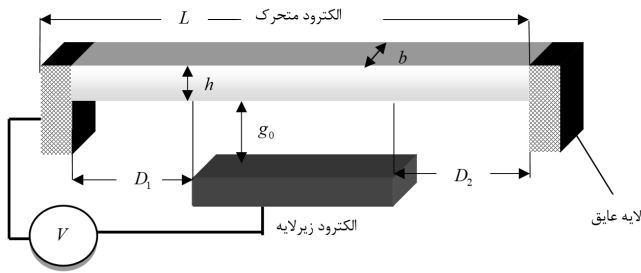


Fig. 1: Schematic view of a partially affected clamped nanoswitch

شکل ۱: نمای شماتیک نانوتیر دو سرگیردار نیمه متأثر

$$U_m = \frac{1}{2} \int_0^L \int_A (\epsilon_{11} \sigma_{11} + \chi_{12} m_{12} + \chi_{21} m_{21}) dA dx$$

$$= \frac{1}{2} \int_0^L \int_A \left[E \left(\frac{\partial u}{\partial x} - z \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right) \right. \\ \left. + \mu l^2 \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)^2 \right] dA dx \quad (15)$$

۲-۴ تنش محوری پسماند

نانوتیر دو سرگیردار و اجزا تغییر خیز مربوطه که تحت بارگذاری نیروهای خارجی و نیروی محوری و تنش پسماند قرار دارند، در شکل ۲ نشان داده شده‌اند.

به سبب اثراتی مانند کشیدگی در نانوتیرهای دو سرگیردار که به آن اثر کشش میان صفحه‌ای^۲ اطلاق می‌شود و عدم تطابق میان ضریب انبساط حرارتی و شبکه بلوره دوره‌ای^۳ بین پایه و الکتروود متحرک که ناشی از روش‌ها و عملیات میکرو ماشین‌کاری سطوح است، یک نیروی محوری پسماند^۴ بر نانوتیر اعمال می‌شود [۶۱]:

$$F_{axial} = F_r + F_a \quad (16)$$

F_r و F_a به ترتیب نیروی پسماند ناشی از تنش پسماند و نیروی محوری به سبب خمش تیر است. انرژی ذخیره‌شده در کلید به واسطه نیروهای محوری عبارت است از:

$$U_s = (F_r + F_a) \Delta L \quad (17)$$

با توجه به شکل ۲ رابطه بین کرنش و خیز به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\epsilon_x = \frac{\Delta L}{L} = \int_0^L \frac{ds - dx}{dx} = \int_0^L \left[\frac{ds}{dx} - 1 \right] dx \quad (18)$$

که ds از قضیه فیثاغورث به صورت زیر به دست می‌آید:

$$ds = \sqrt{\left(dx \right)^2 + \left(\frac{dw}{dx} dx \right)^2} = dx \left[1 + \left(\frac{dw}{dx} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (19)$$

زیرلایه کوتاه‌تر از الکتروود متحرک است و کوتاه بودن الکتروود زیرلایه باعث می‌شود، الکتروود متحرک (نانوتیر) به صورت کامل درگیر نباشد؛ لذا تابع هویساید برای این مدل به گونه‌ای تعریف می‌شود که فقط در بازه $(D_1 \leq x \leq L - D_2)$ برابر با یک و در بقیه فواصل برابر با صفر شود. با در نظر گرفتن الکتروود زیرلایه کوتاه، می‌توان با ضرب تابع هویساید در نیروهای الکترواستاتیک و موئینگی، اثر آن‌ها را فقط در فاصله‌ای که واقعاً بر تیر اثر می‌گذارند اعمال نمود و در بقیه فواصل برابر با صفر هستند.

۲-۳ نظریه تیر اویلر-برنولی (EBT)

برای نانوتیر، مختصات جابه‌جایی اویلر-برنولی به صورت زیر نوشته می‌شود [۴۳]:

$$u_1 = u - z \frac{\partial w(x,t)}{\partial x}, \quad u_2 = 0, \quad u_3 = w(x,t) \quad (9)$$

که z اشاره به فاصله یک نقطه از محور خنثی دارد، w و u نشان‌دهنده جابه‌جایی‌های طولی و عرضی مرکز مقطع عرضی تیر هستند.

با در نظر گرفتن کرنش ون-کارمن^۱، مؤلفه‌های غیرصفر برای کرنش و تنش به ترتیب به شکل زیر محاسبه می‌شوند:

$$\epsilon_{11} = \frac{\partial u_1}{\partial x} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 = \frac{\partial u}{\partial x} - z \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \quad (10)$$

$$\sigma_{11} = E \epsilon_{11} = E \left(\frac{\partial u}{\partial x} - z \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right) \quad (11)$$

با جایگذاری رابطه (۹) در رابطه (۶)، بردار چرخشی غیرصفر برابر است با:

$$\theta_y = - \frac{\partial w(x,t)}{\partial x} \quad (12)$$

سپس با قرار دادن رابطه (۱۲) در رابطه (۵)، تانسور انحنای غیرصفر به دست می‌آید.

$$\chi_{12} = \chi_{21} = - \frac{1}{2} \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial x^2} \quad (13)$$

به طور مشابه، با جایگذاری رابطه (۱۳) در رابطه (۲) رابطه زیر به دست می‌آید:

$$m_{12} = m_{21} = - \mu l^2 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \quad (14)$$

با جایگزین نمودن روابط (۱۴-۱۰) در رابطه (۱) انرژی کرنشی تیر U_m با استفاده از نظریه تنش مزدوج اصلاح‌شده به صورت زیر حاصل می‌شود [۵۴]:

2 Mid-Plane Stretching Effect

3 Crystal Lattice Period

4 Resultant Axial Force

1 Von-Karman Strain

جایگذاری روابط (۲۲) و (۲۴) در (۲۱):

$$U_s = (F_r + F_a) \varepsilon_x L$$

$$= \frac{1}{2} \int_0^L \left[\sigma_r b h + \frac{E b h}{2L} \int_0^L \left(\frac{dw}{dx} \right)^2 dx \right] \left(\frac{dw}{dx} \right)^2 dx, \quad (25)$$

۲-۵ کار نیروهای خارجی

با در نظر گرفتن نیروهای خارجی در واحد طول تیر $q(x, t)$ ، کار انجام شده توسط نیروهای خارجی اعمالی که با W_{ext} نشان داده می‌شود، به صورت زیر است:

$$\delta W_{ext} = \int_0^L q(x, t) \delta w(x, t) dx \quad (26)$$

در این پژوهش، نیروهای خارجی شامل نیروهای الکترواستاتیک و موئینگی می‌شوند. با در نظر گرفتن ضریب اثر میدان لبه^۳، بار گسترده الکترواستاتیک (در واحد طول نانوتیر) که بر نانوکلید اعمال می‌شود، به صورت زیر است [۶۳]:

$$q_{elec}(x, t) = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \frac{b V^2}{[g_0 - w(x, t)]^2} \left(1 + 0.65 \frac{g_0 - w(x, t)}{b} \right) \quad (27)$$

که $\varepsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{Nm}^2$ ضریب خلأ و V ولتاژ خارجی اعمالی است.

نیروی موئینگی اعمالی بر نانوتیر زاویه‌ای برابر با θ_c با بردار واحد عمود بر سطح سیال (زاویه تماس بین مایع و سطح جامد) دارد؛ بنابراین، با در نظر گرفتن تحقیق لگتنبگ و همکاران [۶۴]، نیروی موئینگی در واحد طول تیر به صورت زیر محاسبه می‌شود [۴۱]:

$$q_{cap} = \frac{2 \gamma_{LA} b \cos \theta_c}{(g_0 - w)} \quad (28)$$

که γ_{LA} تنش سطحی مایع-هوا است. با در نظر گرفتن تیر نیمه‌متأثر:

$$q(x, t) = H(x) (q_{elec} + q_{cap}) \quad (29)$$

۲-۶ انرژی جنبشی

انرژی جنبشی نانوتیر به صورت زیر نوشته می‌شود [۶۵]:

$$T_1 = \frac{1}{2} \int_0^L \int_A \rho \left[\left(\frac{\partial u}{\partial t} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial t} \right)^2 \right] dA dx$$

$$= \frac{1}{2} \int_0^L \rho A \left[\left(\frac{\partial u}{\partial t} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial t} \right)^2 \right] dx \quad (30)$$

که ρ چگالی تیر می‌باشد.

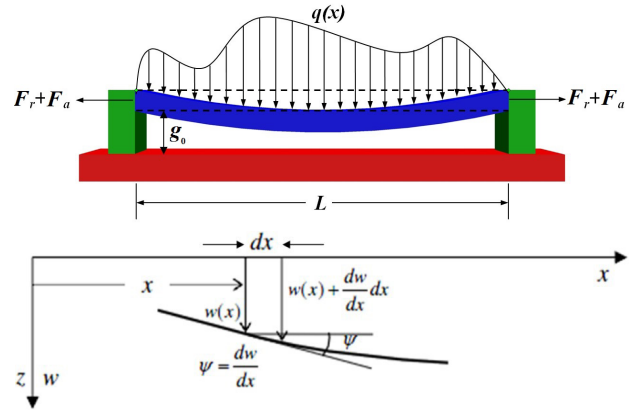


Fig. 2: Clamped nanoswitch and beam deflection element

شکل ۲: نانوکلید دو سرگیردار و جز تغییر خیز

در رابطه بالا dw تغییر خیز تیر در فاصله dx است. با جایگذاری رابطه (۱۹) در رابطه (۱۸) و استفاده از بسط سری دو جمله‌ای کرنش در راستای محور x به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\varepsilon_x = \int_0^L \left[\left(1 + \left(\frac{dw}{dx} \right)^2 \right)^{1/2} - 1 \right] dx$$

$$= \int_0^L \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{dw}{dx} \right)^2 - 1 \right] dx = \int_0^L \frac{1}{2} \left(\frac{dw}{dx} \right)^2 dx \quad (20)$$

با قرار دادن روابط (۱۸) و (۲۰) در رابطه (۱۷) انرژی ذخیره شده در نانوتیر به علت نیروهای محوری به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$U_s = (F_r + F_a) \varepsilon_x L$$

$$= \frac{1}{2} \int_0^L (F_r + F_a) \left(\frac{dw}{dx} \right)^2 dx \quad (21)$$

F_r نیروی محوری که به سبب تنش پسماند می‌باشد، برابر است با [۶۸]:

$$F_r = \sigma_r b h \quad (22)$$

که σ_r نشاندهنده تنش محوری پسماند است. مقدار تنش محوری پسماند براساس شرط مرزی نانوتیر دو سرگیر به صورت زیر است:

$$\sigma_r = \sigma_0 (1 - \nu) \quad (23)$$

که σ_0 تنش پسماند اولیه و ν ضریب پواسون^۱ است.

با استفاده از رابطه (۲۰) جهت تعیین طول تیر پس از خمش و به‌کارگیری قانون هوک^۲، نیروی محوری ناشی از کشش میان صفحه‌ای هندسه غیرخطی ون-کارمن^۲ به صورت زیر است [۶۲]:

$$F_a = \sigma A = \varepsilon E A$$

$$= \frac{\Delta L(x)}{L} E A = \frac{E b h}{2L} \int_0^L \left(\frac{dw}{dx} \right)^2 dx \quad (24)$$

که $E b h / L$ در این رابطه صلیبت محوری تیر نامیده می‌شود. با

- 1 Poisson Ratio
- 2 Hook's Law

۲-۷- معادله حاکم سامانه و بی‌بعدسازی

حال برای به دست آوردن معادله حاکم سامانه نانوتیر دو سرگیردار، به‌کارگیری اصل همیلتون توسعه داده‌شده:

$$\delta \int_0^L (U_m + T_1 - U_s - W_{ext}) dt = 0 \quad (31)$$

که δ نشانگر نماد تغییرات است. با استفاده از روابط (۱۵)، (۲۵)، (۲۶)، (۳۰) و (۳۱) و ساده‌سازی روابط تنش پسماند:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\sigma_r bh + Ebh \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right) \right) = \rho A \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (32)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(- \left(\sigma_r bh + Ebh \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right) \right) \right) \frac{\partial w}{\partial x} + (EI + \mu AI^2) \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} + \rho A \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = q(x, t) \quad (33)$$

رابطه (۳۳) نشان می‌دهد که صلبیت خمشی تیر شامل دو بخش است، بخش EI به‌عنوان صلبیت خمشی نظریه کلاسیک و بخش μAI^2 که مربوط به نظریه تنش مزدوج اصلاح شده است.

شرایط مرزی برای نانوتیر دو سرگیردار:

$$\begin{cases} u(0, t) = u(L, t) = 0 \\ w(0, t) = w(L, t) = 0, \quad \frac{\partial w}{\partial x} \Big|_{x=0, L} = 0 \end{cases} \quad (34)$$

به‌طورمعمول، از اینرسی طولی $\rho A \partial^2 u / \partial t^2$ صرف‌نظر می‌شود [۶۶] که در نتیجه [۵۴]:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 = \frac{1}{2L} \int_0^L \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 dx \quad (35)$$

با جایگزین کردن رابطه (۳۵) در رابطه (۳۳)، معادله دیفرانسیل غیرخطی حاکم بر جابه‌جایی عرضی نانوتیر به دست می‌آید.

$$(EI + \mu AI^2) \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \rho A \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} - \left[\sigma_r bh + \frac{Ebh}{2L} \int_0^L \left(\frac{dw}{dx} \right)^2 dx \right] \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = q(x, t) \quad (36)$$

پس از جایگزینی رابطه (۲۹) در (۳۶)، به‌منظور ساده‌سازی محاسبات پارامتری، می‌توان معادله حاکم و شرایط مرزی را به حالت بی‌بعد تبدیل کرد؛ لذا از متغیرهای بی‌بعد $X = x/L$ ، $W = w/g_0$ و پارامترهای زیر جهت بی‌بعدسازی بهره برده می‌شود:

$$\beta = \frac{\varepsilon_0 b V^2 L^4}{2 g_0^3 EI}, \quad \gamma_{fr} = 0.65 \frac{g_0}{b},$$

$$\gamma_{ca} = \frac{2 \gamma_{LA} b L^4 \cos \theta_c}{EI g_0^2}, \quad \eta = 6 \left(\frac{g_0}{h} \right)^2,$$

$$\delta = \frac{\mu AI^2}{EI} = \frac{12 \mu}{E(h/l)^2}, \quad N = \frac{\sigma_r bh L^2}{EI} \quad (37)$$

$$T = t \sqrt{\frac{EI}{\rho AL^4}}, \quad d_i = \frac{D_i}{L} \quad (i=1, 2),$$

$$H' = H \left(\frac{x}{L} \right) = H \left(\frac{x}{L} - \frac{D_2}{L} \right) - H \left(\frac{x}{L} - 1 + \frac{D_2}{L} \right),$$

که پارامترهای W ، X ، β ، γ_{fr} ، γ_{ca} ، δ ، H' ، d_i ، N ، η و T به ترتیب متناظر با پارامترهای بی‌بعد انحراف نانوتیر، مکان (در راستای طولی)، ولتاژ، میدان لبه، نیروی موئینگی، اثر اندازه، تابع هویساید بی‌بعد، پارامتر بی‌بعد فاصله میان انتهای چپ (برای $i=1$) و راست (برای $i=2$) استفاده الکتروود زیرلایه و کلید، نیروی محوری، کشش و زمان می‌باشند. با استفاده از پارامترهای بی‌بعد رابطه (۳۷) در رابطه (۳۶)، معادله حاکم بی‌بعد نانوکلید دوسرگیردار نیمه‌متأثر به‌صورت زیر درمی‌آید:

$$(1 + \delta) \frac{\partial^4 W}{\partial X^4} + \frac{\partial^2 W}{\partial T^2} - N_s \frac{\partial^2 W}{\partial X^2} =$$

$$H' \left(\frac{\beta}{(1 - W(x))^2} + \frac{\gamma_{fr} \beta}{(1 - W(x))} + \frac{\gamma_{ca}}{(1 - W(x))} \right) \quad (38)$$

$$. N_s = \left[N + \eta \int_0^1 \left(\frac{\partial W}{\partial X} \right)^2 dX \right] \text{ که}$$

بنابراین، شرایط مرزی بی‌بعد به ترتیب برای نانوتیر دو سرگیردار با جایگذاری پارامترهای بی‌بعد در رابطه (۳۶) به دست می‌آیند:

$$W(0) = W(1) = 0, \quad \frac{\partial W}{\partial X} \Big|_{x=0, 1} = 0 \quad (39)$$

به‌منظور به دست آوردن معادله حاکم برای حالت استاتیکی، عبارات وابسته به زمان حذف می‌شوند.

$$(1 + \delta) \frac{\partial^4 W}{\partial X^4} - N_s \frac{\partial^2 W}{\partial X^2} = H' \left(\frac{\beta}{(1 - W(x))^2} + \frac{\gamma_{fr} \beta}{(1 - W(x))} + \frac{\gamma_{ca}}{(1 - W(x))} \right) \quad (40)$$

۳- روش حل و اعتبارسنجی

۳-۱- روش حل

دسته معادلات دیفرانسیل پاره‌ای، یعنی روابط (۳۸) و (۴۰) و شرایط مرزی متناظر یعنی رابطه (۳۹) از طریق روش اجزا محدود حل شده‌اند. بدین

- 1 Modified Hamilton Principle
- 2 Longitudinal Inertia

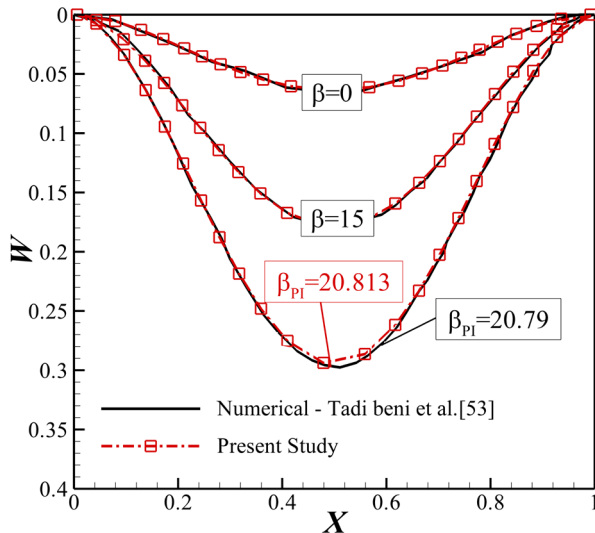


Fig. 4. The transverse deflection of the nanoswitch in its longitudinal direction for different pull-in parameters ($d_1 = d_2 = 0, N = 0, \eta = 0, \delta = 0, \gamma_{fr} = 0, \gamma_{ca} = 0$)

شکل ۴: انحراف عرضی نانوتیر در راستای طولی آن برای پارامترهای بی بعد ولتاژ متفاوت ($d_1 = d_2 = 0, N = 0, \eta = 0, \delta = 0, \gamma_{fr} = 0, \gamma_{ca} = 0$)

اولیه آن تا مقدار نهایی اش افزایش می یابد. مشاهده می شود که بیشترین مقدار انحراف تیر دو سردرگیر در میانه آن رخ می دهد. پارامتر بی بعد پولین ولتاژ (نیروی الکترواستاتیک) با استفاده از روش حاضر برابر با $20/813$ به دست آمده در حالی که مقدار متناظر در پژوهش [۵۳] برابر با $20/79$ است که نشان دهنده تطابق خوب میان نتایج است.

۴- بحث و نتیجه گیری

به منظور بررسی ناپایداری نانومحرک، رابطه (۳۸) با روش اجزا محدود حل شده و اثرات پارامترهای مختلف نسبت به یکدیگر بررسی می شود. برای مقادیر متفاوت از پارامترهای β ، γ_{ca} و γ_{fr} ، انحراف نهایی پولین دینامیکی نانوتیر با حل رابطه (۳۸) و برای پولین استاتیکی با حل رابطه (۴۰) و در نظر گرفتن $du(1)/d\beta \rightarrow \infty$ به دست می آید. در مدل تیر مدنظر در این پژوهش تأثیر پارامترهای بی بعد اثر میدان لبه، اثر اندازه، موقعیت و طول الکتروود زیرلایه، نیروهای الکترواستاتیک، موئینگی بر ناپایداری نانوکلید مورد مطالعه قرار می گیرد. ابعاد و مشخصات فیزیکی نانوکلید دو سرگیردار که از جنس سیلیکون است، در جدول ۱ ارائه شده است.

۴-۱- اثر میدان لبه

میدان مغناطیسی از اعمال نیروی الکترواستاتیک بین دو صفحه حاصل می گردد و اثر میدان لبه به علت میدان مغناطیسی لبه و سطح بیرونی پدید می آید. شکل های ۵ (الف) و ۵ (ب) به ترتیب تأثیر اثر میدان لبه بر پارامتر بی بعد ولتاژ برحسب تابعی از انحراف نهایی میانه تیر را برای حالت استاتیکی برای دو نمونه نانوتیر با الکتروود زیرلایه با طول کامل ($d_1 = d_2 = 0$) و نانوتیر نیمه متأثر ($d_1 = d_2 = 0.3$) را نشان می دهند.

منظور معادلات یادشده در شکل ضعیف، فرمول بندی و سپس با استفاده از روش گالری حل شده اند. جزئیات روش حل در [۶۷] ذکر شده و برای اختصار از تکرار آن در اینجا صرف نظر می گردد.

۳-۲- اعتبارسنجی

به منظور اعتبارسنجی روش حل عددی ارائه شده، نتایج مبتنی بر نظریه تنش مزدوج اصلاح شده در این پژوهش با نتایج پژوهش های پیشین [۲۸ و ۵۴-۵۳] مقایسه شده اند. همان گونه که در ادامه مشاهده می شود، میان نتایج پژوهش حاضر و مراجع [۲۸ و ۵۴-۵۳] تطابق خوبی مشاهده می شود.

در شکل ۳ اثر استاتیکی پارامتر بی بعد کشش میان صفحه های η ، بر پارامترهای پولین β و انحراف نهایی بی بعد W_{mid} برای تیر دو سردرگیر بررسی شده است. نتایج حاکی از آن هستند که برای η های بزرگ تر، معادله حاکم واگرا می شود. نتایج به دست آمده در پژوهش حاضر با کارهای یزدان پناهی و همکاران [۲۸] و عبدالرحمان و همکاران [۵۴] مقایسه شدند و تطابق خوبی مشاهده شد. یزدان پناهی و همکاران [۲۸] از دو روش حل تحلیلی ادومین و روش حل عددی اقدام به حل معادلات حاکم نموده اند.

با مشاهده شکل ۳ می توان دریافت که مقادیر بالای η باعث واگرا شدن معادله حاکم پیش از ناپایداری پولین می شود. از این رو، مقادیر کمتر پارامتر η (ترجیحاً کوچک تر از ۱۰) برای تحلیل ناپایداری نانوتیر-کلیدها با استفاده از مدل کشش میان صفحه های مناسب است [۵۴].

در شکل ۴ نتایج به دست آمده در مورد انحراف عرضی نانوتیر دو سردرگیر در راستای طولی آن، با نتایج طادی بنی و همکاران [۵۳] مقایسه شدند.

همان گونه که در شکل ۴ مشاهده می شود، در حالت استاتیکی با افزایش پارامتر بی بعد ولتاژ از صفر تا مقدار پولین آن، انحراف عرضی تیر از مقدار

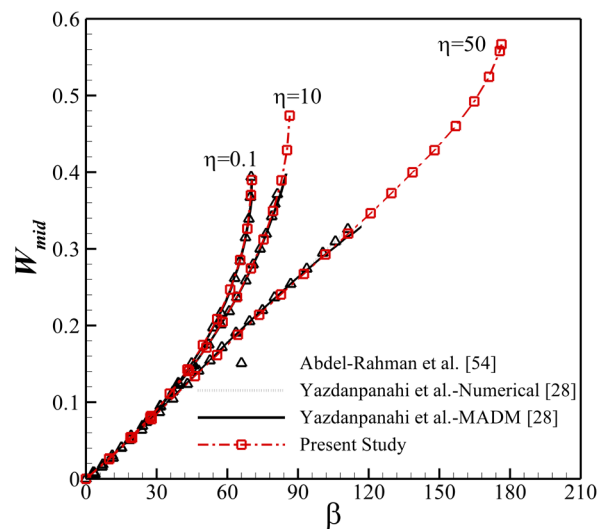


Fig. 3. Effect of Mid-Plane Stretching Effect on dimensionless pull-in voltage and deflection parameters ($d_1 = d_2 = 0, N = 0, \delta = 0, \gamma_{fr} = 0, \gamma_{ca} = 0$)

شکل ۳: اثر پارامتر کشش میان صفحه های بر پارامترهای پولین ولتاژ و انحراف بی بعد ($d_1 = d_2 = 0, N = 0, \delta = 0, \gamma_{fr} = 0, \gamma_{ca} = 0$)

جدول ۱: ابعاد و مشخصات فیزیکی نانوکلید سیلیکونی

Table 1. Dimensions and physical properties of silicon nanoswitch

پارامتر	مقدار
طول (L)	$350\ \mu\text{m}$
فاصله اولیه دو الکتروود (g_0)	$3\ \mu\text{m}$
ضخامت (h)	$1\ \mu\text{m}$
عرض الکتروود (b)	$50\ \mu\text{m}$
مدول یانگ (E)	$189\ \text{GPa}$
نسبت پواسون (ν)	0.33

می‌توان به این نکته پی برد که با نیمه‌متأثر شدن نانوتیر دو سردرگیر (کوتاه شدن الکتروود زیرلایه) پارامتر جابه‌جایی نهایی اندکی کاهش پیدا می‌کند.

۴-۲- اثر اندازه

شکل ۸ تغییرات پارامتر ولتاژ دینامیکی و نهایی نانوکلید را نسبت به پارامتر موئینگی نهایی برای مقادیر متفاوت پارامتر اثر اندازه و دو نمونه نانوتیر با الکتروود زیرلایه با طول کامل ($d_1 = d_2 = 0$) و نانوتیر نیمه‌متأثر ($d_1 = 0, d_2 = 0.2$) را نشان می‌دهد.

با توجه به شکل ۸ در نانوکلیدهای دوسرگیردار، اثر اندازه پارامترهای

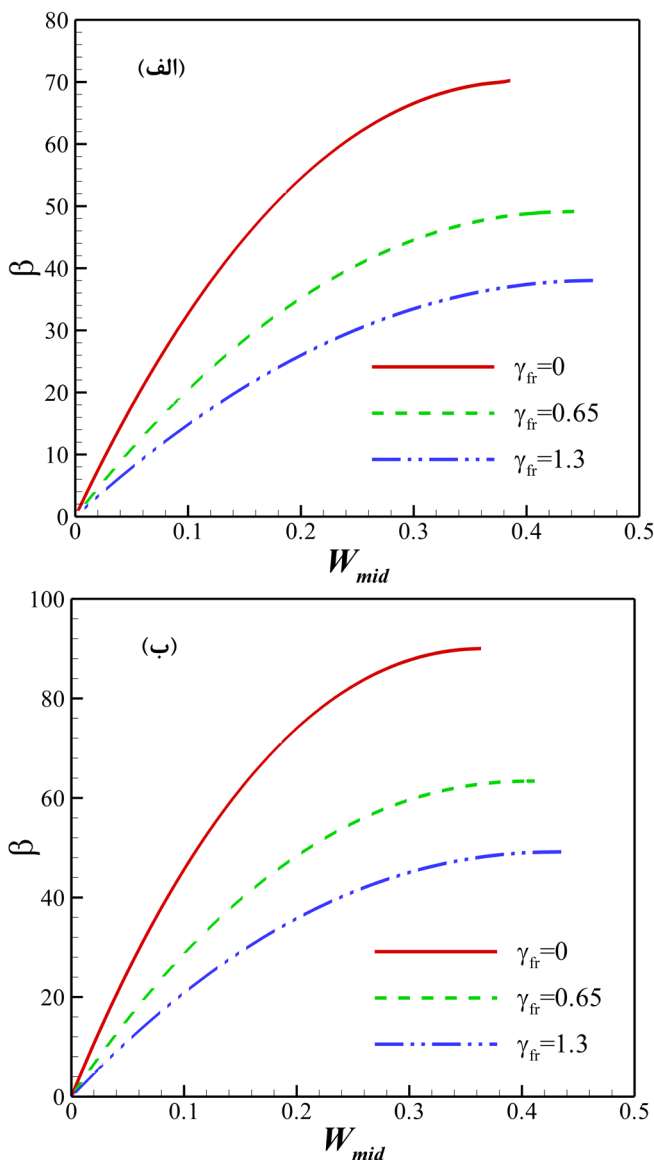


Fig. 5. Effect of fringing field effect on dimensionless pull-in voltage β and tip deflection parameters for different values of γ_{fr} and ($\eta = 0, N = 0, \delta = 0, \gamma_{ca} = 0$) for (a) $d_1 = d_2 = 0$, (b) $d_1 = d_2 = 0.3$

شکل ۵: اثر پارامتر میدان لیه بر پارامترهای بی‌بعد β و انحراف نهایی تیر برای مقادیر متفاوت γ_{fr} و ($N=0, \eta=0, \delta=0, \gamma_{ca}=0$) برای $d_1 = d_2 = 0.3$ (ب)، $d_1 = d_2 = 0$ (الف)

همان‌گونه که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، افزایش اثر میدان لیه باعث افزایش W_{mid} و کاهش β می‌شود. کاهش مقدار پارامتر بی‌بعد β به این دلیل است که مقدار اثر میدان لیه به نیروی الکترواستاتیک اضافه شود؛ در نتیجه مقدار نیروی الکترواستاتیک کل افزایش می‌یابد [۵۳]، لذا برای مقادیر بزرگ‌تر از صفر، اثر میدان لیه در روابط باید در نظر گرفته شود.

همچنین مشاهده می‌شود، برای مقادیر یکسان اثر میدان لیه، در مقایسه با نانوتیر با طول الکتروود زیرلایه کامل، نانوتیر نیمه‌متأثر در ازای انحراف‌های یکسان میانه تیر، به مقدار نیروی الکترواستاتیکی بیشتری نیاز دارد. همچنین با افزایش اثر میدان لیه، مقدار جابه‌جایی نهایی نانوتیر نیز افزایش می‌یابد.

شکل ۶ (الف) و ۶ (ب)، به ترتیب تأثیر اثر میدان لیه بر پارامترهای بی‌بعد ولتاژ و نیروی موئینگی نهایی برای دو حالت استاتیکی و دینامیکی را در غیاب اثر اندازه ($\delta=0$) برای دو نمونه نانوتیر با الکتروود زیرلایه با طول کامل ($d_1 = d_2 = 0$) و نانوتیر نیمه‌متأثر ($d_1 = 0, d_2 = 0.2$) نشان می‌دهند.

از شکل‌های ۶ نتیجه می‌شود که در مقادیر یکسان نیروی موئینگی و اثر میدان لیه، در حالت دینامیکی نسبت به حالت استاتیکی، نانوکلیدها با اعمال نیروی کمتری (ولتاژ الکتریکی پایین‌تری) به ناپایداری می‌رسند. همچنین می‌توان مشاهده نمود که با افزایش پارامتر نیروی موئینگی، نسبت پارامتر ولتاژ بی‌بعد پولین استاتیکی β_{PI} به دینامیکی β_{PID} افزایش می‌یابد. با توجه به شکل ۶، با کوتاه شدن طول الکتروود زیرلایه، مقدار نهایی پارامترهای ولتاژ و موئینگی بی‌بعد افزایش می‌یابد، این بدین معناست که در تیر نیمه‌متأثر، پیش از رسیدن به ناپایداری پولین، به نیروی بیشتری نیاز است.

شکل‌های ۷ (الف) و ۷ (ب)، به ترتیب بیانگر تأثیر اثر میدان لیه بر پارامترهای بی‌بعد انحراف نهایی میانه نانوتیر و نیروی موئینگی نهایی برای دو حالت استاتیکی و دینامیکی را در غیاب اثر اندازه ($\delta=0$) برای دو نمونه نانوتیر با الکتروود زیرلایه با طول کامل ($d_1 = d_2 = 0$) و نانوتیر نیمه‌متأثر ($d_1 = 0, d_2 = 0.2$) را نشان می‌دهند.

شکل‌های ۷ حاکی از آن هستند که افزایش پارامتر اثر میدان لیه باعث اضافه شدن یک نیروی خارجی به کلید می‌شود و بدین سبب جابه‌جایی نهایی تیر افزایش پیدا می‌کند. همچنین افزایش اثر میدان لیه تأثیری بر پارامتر موئینگی نهایی نانوکلید دو سردرگیر ندارد. با مشاهده شکل‌های ۷

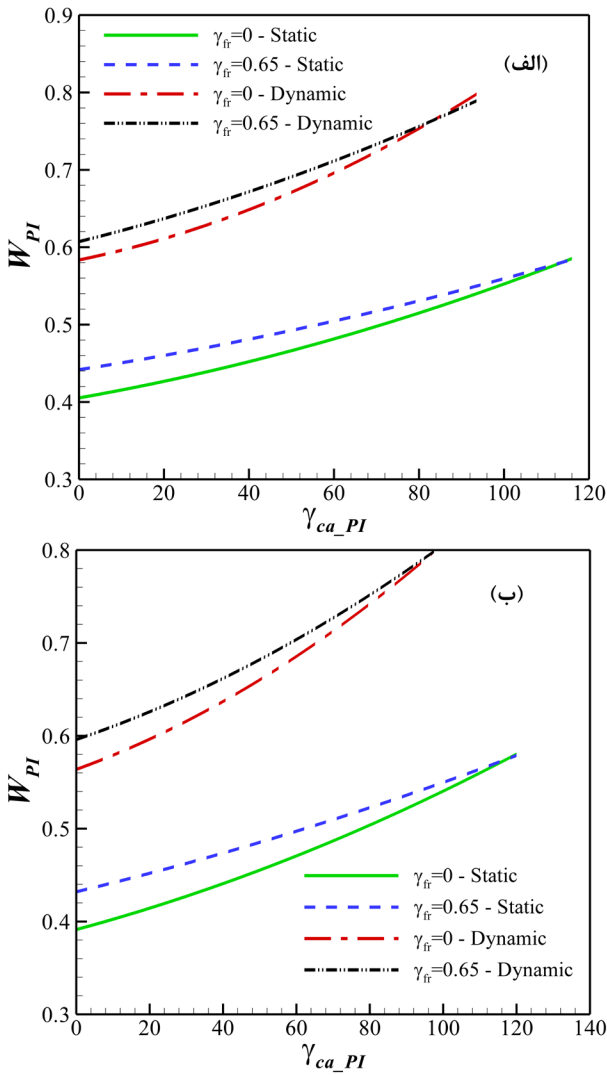


Fig. 7. Effect of fringing field effect on dimensionless pull-in voltage β and capillary force γ_{ca_PI} parameters for different values of γ_{fr} and $(\eta = 0, N = 0, \delta = 0)$, for (a) $d_1 = d_2 = 0$ (b) $d_1 = 0, d_2 = 0.2$

شکل ۷: اثر پارامتر میدان لبه بر پارامترهای بی بعد ولتاژ β و نیروی موئینگی γ_{ca} برای مقادیر متفاوت γ_{fr} و $(N=0, \eta=0, \delta=0)$: (الف) $d_1=d_2=0$ ، (ب) $d_1=0, d_2=0.2$

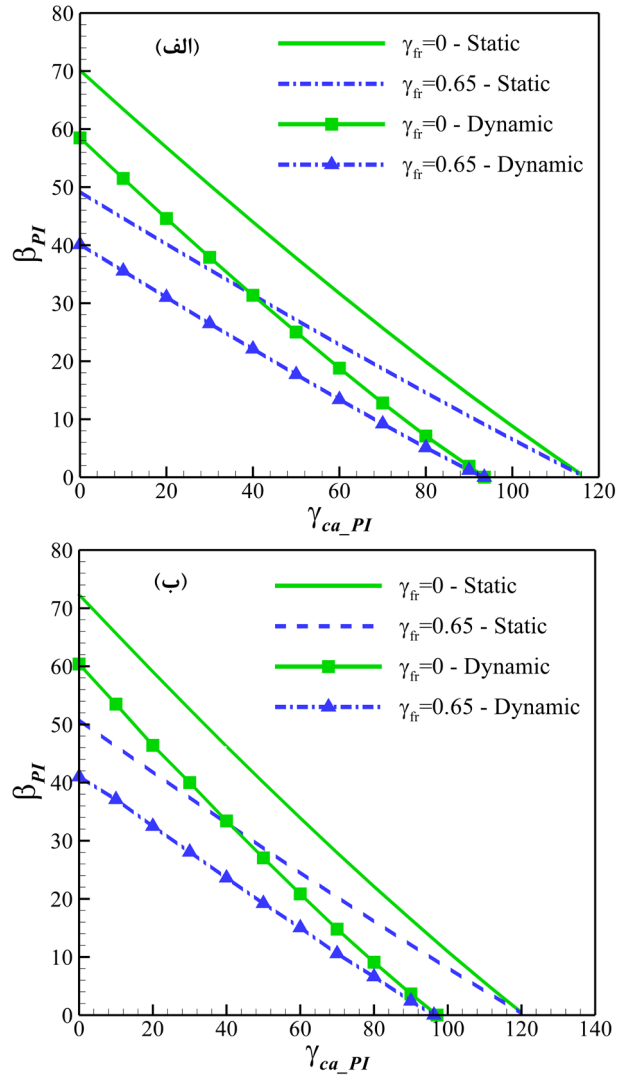


Fig. 6. Effect of fringing field effect on dimensionless pull-in voltage β and pull-in deflection W_{PI} parameters for different values of γ_{fr} and $(\eta = 0, N = 0, \delta = 0)$ (a) $d_1 = d_2 = 0$, (b) $d_1 = 0, d_2 = 0.2$

شکل ۶: اثر پارامتر میدان لبه بر پارامترهای بی بعد ولتاژ β و نیروی موئینگی γ_{ca} برای مقادیر متفاوت γ_{fr} و $(N=0, \eta=0, \delta=0)$: (الف) $d_1=d_2=0$ ، (ب) $d_1=0, d_2=0.2$

مقدار خاصی از پارامتر موئینگی ($\gamma_{ca} = 10/667$) متفاوت است. در واقع، برای مقادیر پارامتر موئینگی کوچکتر از $10/667$ ، با اثر اندازه بزرگتر، جابه‌جایی نهایی نانوتیر بیشتر بوده و برای مقادیر بزرگتر از عدد مذکور این روند عکس می‌شود.

در این پژوهش، نقطه برخورد نمودارها، با نام متعادل‌کننده اثر اندازه-نیروی موئینگی^۱ تعریف می‌شود. از لحاظ فیزیکی، متعادل‌کننده اثر اندازه-نیروی موئینگی مفهوم بسیار مهم و مفیدی می‌تواند داشته باشد؛ زیرا با انتخاب این مقدار از پارامتر موئینگی، می‌توان نانوکلیدی را طراحی نمود که تأثیر اثر اندازه بر آن کلید ناچیز باشد.

بحرانی موئینگی و ولتاژ نهایی را افزایش می‌دهد. با مقایسه نتایج برای دو نمونه از نانوتیر می‌توان دریافت که در نانوکلیدهای دوسرگردار نیمه‌متأثر، تأثیر پارامتر اندازه بر پارامترهای ولتاژ و موئینگی نهایی بیشتر از نانوکلید با الکتروود زیرلایه با طول کامل است.

در شکل‌های ۹ (الف) و ۹ (ب) تغییرات پارامتر جابه‌جایی نهایی نانوکلید برای حالت دینامیکی نسبت به پارامتر موئینگی نهایی برای مقادیر متفاوت پارامتر اثر اندازه به ترتیب نانوتیر با الکتروود زیرلایه با طول کامل ($d_1 = d_2 = 0$) و نانوتیر نیمه‌متأثر ($d_1 = 0, d_2 = 0.2$) نشان داده شده‌اند.

از شکل ۹ (ب)، می‌توان دریافت که برای نانوکلیدهای دو سرگردار و نیمه‌متأثر، در نقطه برخورد نمودارها (نقطه A)، تغییر پارامتر اندازه تأثیری بر جابه‌جایی نهایی نانوتیر ندارد و رفتار جابه‌جایی نانوتیر در قبل و بعد از

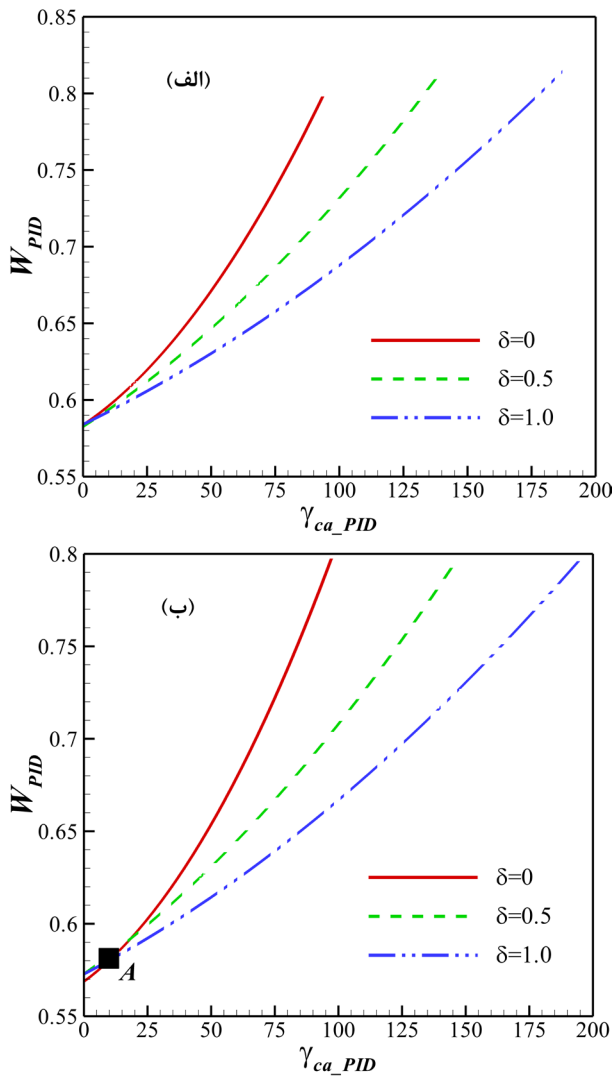


Fig. 9. Variation of pull-in displacement parameter against pull-in capillary force parameter for different values of size effect parameter and $(\eta = 0, N = 0, \gamma_{fr} = 0)$: (a) $d_1 = d_2 = 0$, (b) $d_1 = 0, d_2 = 0.2$

شکل ۹: تغییرات پارامتر ولتاژ نهایی نسبت به پارامتر موئینگی نهایی برای مقادیر متفاوت پارامتر اثر اندازه و $(\eta = 0, N = 0, \gamma_{fr} = 0)$ (الف) $d_1 = d_2 = 0$ ، (ب) $d_1 = 0, d_2 = 0.2$ ؛

الکتروود زیرلایه) نشان می‌دهد.

با توجه به شکل ۱۱ ولتاژ نهایی و موئینگی نهایی برای نانوتیر دو سرگردار با الکتروود زیرلایه کوتاه بیشتر از نانوتیر با الکتروود زیرلایه با طول کامل است. همچنین شکل ۱۲ نشان‌دهنده این است که خیز نهایی برای نانوتیر دو سرگردار با الکتروود زیرلایه کوتاه کمتر از نانوتیر با الکتروود زیرلایه با طول کامل است.

به عبارت دیگر برای نانوتیر دو سرگردار، نیمه‌متأثر شدن باعث کاهش خیز نهایی می‌شود.

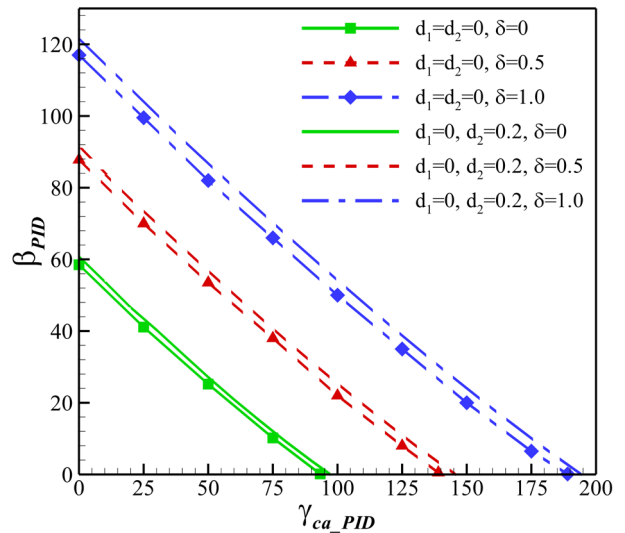


Fig. 8. Variation of pull-in voltage parameter against pull-in capillary force parameter for different values of size effect parameter and $(\eta = 0, N = 0, \gamma_{fr} = 0)$ for $d_1 = d_2 = 0$ and $d_1 = 0, d_2 = 0.2$

شکل ۸: تغییرات پارامتر ولتاژ نهایی نسبت به پارامتر موئینگی نهایی برای مقادیر متفاوت پارامتر اثر اندازه و $(\eta = 0, N = 0, \gamma_{fr} = 0)$ برای $d_1 = 0, d_2 = 0.2$ و $d_1 = d_2 = 0$ ؛

۳-۴ اثر نیروهای الکترواستاتیک و موئینگی

شکل‌های ۱۰ (الف) و ۱۰ (ب) به ترتیب نوسانات نانوتیر دو سرگردار نیمه‌متأثر را در طی زمان تحت تأثیر نیروهای الکترواستاتیک و موئینگی نشان می‌دهند.

در هر کدام از این دو شکل اثر یک نیرو بررسی و از دیگری صرف‌نظر شده‌است. در شکل‌های ۱۰ انحراف دینامیکی نانوتیر به سبب نیروهای وارد بر آن در طی زمان، پیش و بعد از پدیده ناپایداری پولین تحلیل شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، پیش از این که تیرک دچار ناپایداری شود، میان کمترین و بیشترین مقدار انحراف خود از حالت پایدارش، به صورت سینوسی حرکت می‌کند. با افزایش مقدار نیروی وارد شده بر نانوتیر تا مقدار پولین آن‌ها، تیرک در حداکثر محدوده حرکتش نوسان می‌کند.

با بیشتر شدن مقدار نیروها از مقدار پولین دینامیکی، نانوتیر ناپایدار شده و تیرک بر روی الکتروود زیرلایه سقوط می‌کند. بعد از مقدار پولین دینامیکی، تغییر جزئی در نیروها باعث این ناپایداری می‌شود. با توجه به شکل‌های ۱۰، در صورت تحریک میکرو/نانوتیر دو سرگردار نیمه‌متأثر مقادیر پولین برای پارامترهای بی‌بعد نیروهای الکترواستاتیک و نیروی موئینگی به ترتیب برابر با $80/49659$ و $147/30141$ می‌باشند.

۴-۴ پارامترهای طول و موقعیت الکتروود زیرلایه (d_1, d_2)

شکل ۱۱ تغییرات پارامتر ولتاژ نهایی نانوتیر را در حالت دینامیکی نسبت به پارامتر بی‌بعد موئینگی برای مقادیر متفاوت پارامتر موقعیت و مکان الکتروود زیرلایه (طول الکتروود زیرلایه) نشان می‌دهد. همچنین در شکل ۱۲ تغییرات پارامتر جابه‌جایی نهایی نانوتیر را نسبت به پارامتر بی‌بعد موئینگی در حالت دینامیکی برای مقادیر متفاوت پارامتر موقعیت و مکان الکتروود زیرلایه (طول

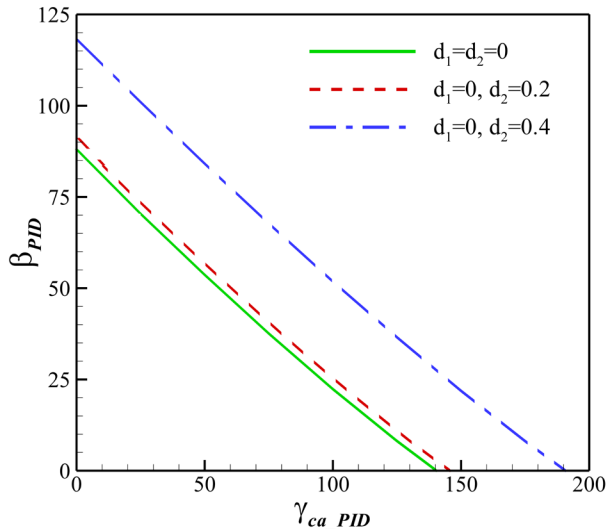


Fig. 11. Variation of pull-in voltage parameter against pull-in capillary force parameter for different values of length and position of substrate electrode parameter ($\gamma_{fr} = 0, \eta = 0, N = 0, \delta = 0.5, \gamma_{fr} = 0$)

شکل ۱۱: تغییرات پارامتر ولتاژ نهایی نسبت به پارامتر موئینگی نهایی برای مقادیر متفاوت پارامترهای طول و موقعیت الکترود زیرلایه ($\gamma_{fr} = 0, \eta = 0, N = 0, \delta = 0.5, \gamma_{fr} = 0$)

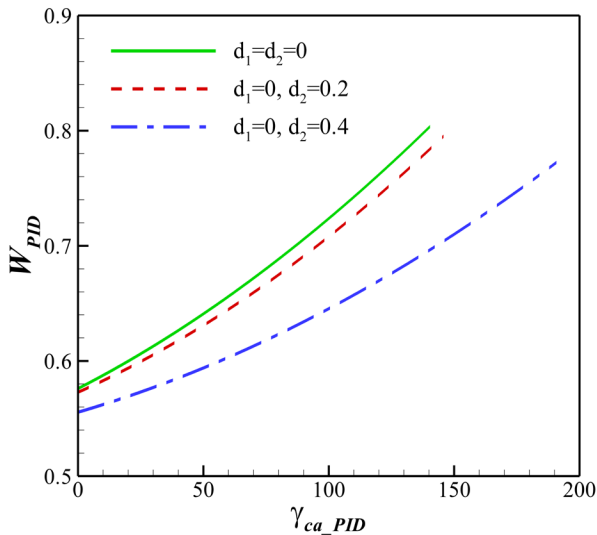


Fig. 12. Variation of pull-in Voltage parameter against pull-in capillary force parameter for different values of length and position of substrate electrode parameters ($\gamma_{fr} = 0, \eta = 0, N = 0, \delta = 0.5, \gamma_{fr} = 0$)

شکل ۱۲: تغییرات پارامتر جابه‌جایی نهایی نسبت به پارامتر موئینگی نهایی برای مقادیر متفاوت پارامترهای طول و موقعیت الکترود زیرلایه ($\gamma_{fr} = 0, \eta = 0, N = 0, \delta = 0.5, \gamma_{fr} = 0$)

به افزایش پارامتر خیز نهایی میانه نانوتیر W_{PI} و کاهش پارامتر ولتاژ پولین β_{PI} می‌شود. بدین سبب در نظر گرفتن مقادیر بزرگ اثر میدان لبه در روابط الزامی و مهم است.

- در شرایط یکسان، نرخ تغییرات پارامترهای W_{PI} و β_{PI} برای نانوتیر نیمه‌متأثر بیشتر از نانوتیر با الکترود زیر با طول کامل است.
- در حالت دینامیکی نسبت به حالت استاتیکی، نانوکلیدها با اعمال نیروی کمتری (ولتاژ الکتریکی پایین‌تری) به ناپایداری می‌رسند.

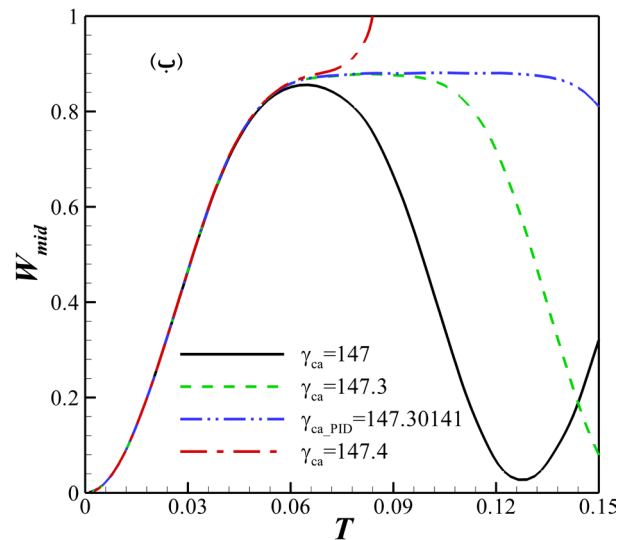
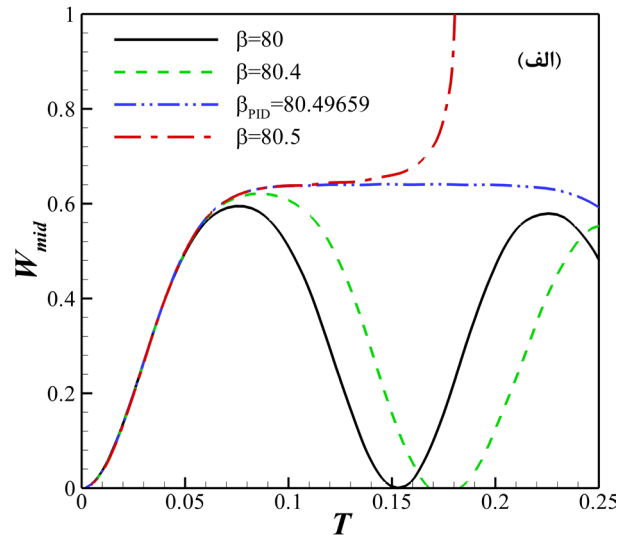


Fig. 10. Variation of tip deflection during time for different values of: (a) Dimensionless Voltage parameter, (b) Dimensionless Capillary force parameter ($\gamma_{fr} = 0, \eta = 8, N = 5, \delta = 0, d_1 = d_2 = 0.2$)

شکل ۱۰: تغییرات پارامتر انحراف حداکثر و نهایی تیر در طی زمان برای مقادیر متفاوت پارامترهای بی‌بعد: (الف) ولتاژ نهایی (نیروی الکترواستاتیک)، (ب) نیروی موئینگی ($\gamma_{fr} = 0, \eta = 8, N = 5, \delta = 0, d_1 = d_2 = 0.2$)

۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این پژوهش مدلی جامع بر مبنای نظریه تنش مزدوج اصلاح‌شده برای نانوتیر دو سرگیردار به منظور بررسی ناپایداری‌های استاتیکی و دینامیکی پولین، توسعه یافته است.

اثرات ناشی از نیروهای الکترواستاتیک و موئینگی، میدان لبه، اثر اندازه و موقعیت و طول الکترود زیرلایه بر مدل جدید تحلیل شده است. معادلات حاکم غیرخطی برای تیر اویلر-برنولی و براساس اصل همپلتون به دست آمدند و از روش حل عددی اجزا محدود جهت حل روابط استاتیکی و دینامیکی بهره برده شد. نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

- به‌طورکلی، برای نانوتیر دو سرگیردار افزایش اثر میدان لبه، منجر

تابع پله‌ای هویساید	$H(x)$
تابع بی‌بعد پله‌ای هویساید	H'
ضخامت تیر، μm^2	h
ممان اینرسی سطح، m^4	I
طول تیر، μm^2	L
پارامتر مقیاس طول	l
جز منحرف‌شده تانسور تنش مزدوج	m_{ij}
پارامتر بی‌بعد نیروی محوری	N
مجموع پارامترهای بی‌بعد نیروی محوری و کشش میان صفحه‌ای	N_s
نیروی وارده بر تیر، Nm^{-1}	$q(x,t)$
پارامتر بی‌بعد زمان	T
کار انرژی جنبشی نانوتیر، J	T_1
کار انرژی کرنشی تیر، N	U_m
کار انرژی ذخیره‌شده در نانوتیر به علت نیروهای محوری، N	U_s
انحراف طولی تیر، μm^2	u
ولتاژ اعمالی بین پایه و الکتروود کار نیروها، N	V
انحراف بی‌بعد نانوتیر	W_{ext}
انحراف عرضی تیر، μm^2	W
	w

علائم یونانی

مدول برشی	μ
چگالی	ρ
ثابت اول لامه	λ
تانسور تنش	σ_{ij}
تانسور کرنش	ε_{ij}
مؤلفه غیرصفر کرنش	ε_{11}
تنش محوری پسماند	σ_r
تنش پسماند اولیه	σ_0
مؤلفه غیرصفر تنش	σ_{11}
تانسور انحنا	χ_{ij}
تابع دلتای کرونگر	δ_{ij}
اثر اندازه	δ
ضریب خالص، $\text{C}^2\text{N}^{-1}\text{m}^{-2}$	ε_0
ضریب پواسون	ν
پارامتر بی‌بعد کشش میان صفحه‌ای	η
تنش سطحی مایع-هوا	γ_{LA}
زاویه تماس بین مایع و سطح جامد	θ_c
بردار چرخشی	θ_i
بردار چرخشی غیرصفر	θ_y
پارامتر بی‌بعد میدان لبه	γ_{fr}
پارامتر بی‌بعد کشش سطحی	η

زیرنویس‌ها

موئینگی	ca
الکترواستاتیک	$elec$
خارجی	ext
اثر میدان لبه	fr
میانه تیر	mid
کششی	$Stretching$
پولین-پولین استاتیکی	PI
پولین دینامیکی	PID

همچنین، با افزایش پارامتر نیروی موئینگی، نسبت پارامتر ولتاژ بی‌بعد پولین استاتیکی β_{PI} به دینامیکی β_{PID} افزایش می‌یابد.

با کوتاه شدن طول الکتروود زیرلایه، مقدار پارامترهای بی‌بعد ولتاژ و موئینگی نهایی افزایش می‌یابد، این بدین معناست که در نانوتیر نیمه‌متأثر، پیش از رسیدن به ناپایداری پولین، به نیروی بیشتری نیاز است.

افزایش پارامتر اثر میدان لبه باعث اضافه شدن یک نیروی خارجی به کلید می‌شود و بدین سبب جابه‌جایی نهایی تیر افزایش پیدا می‌کند. نیمه‌متأثر شدن نانوتیر دو سردگیر (کوتاه شدن الکتروود زیرلایه) منجر به کاهش اندک پارامتر جابه‌جایی نهایی در حالت‌های استاتیکی و دینامیکی می‌شود.

در نانوکلیدهای دوسرگیردار، اثر اندازه پارامترهای بحرانی موئینگی و ولتاژ را افزایش می‌دهد. با مقایسه نتایج برای دو نمونه از نانوتیر می‌توان دریافت که در نانوکلیدهای دوسرگیردار نیمه‌متأثر، تأثیر پارامتر اندازه بر پارامترهای ولتاژ و موئینگی نهایی بیشتر از نانوکلید با الکتروود زیرلایه با طول کامل است.

برای نانوکلیدهای دوسرگیردار و نیمه‌متأثر، رفتار جابه‌جایی نانوتیر در قبل و بعد از مقدار خاصی از پارامتر موئینگی ($\gamma_{ca} = 10.667$) متفاوت است. در واقع، برای مقادیر پارامتر موئینگی کوچک‌تر از $10/667$ ، با اثر اندازه بزرگ‌تر، جابه‌جایی نهایی نانوتیر بیشتر بوده و برای مقادیر بزرگ‌تر از عدد مذکور این روند عکس می‌شود. این نقطه در روند تحلیل نانوتیر دو سرگیردار نیمه‌متأثر متعادل‌کننده اثر اندازه-نیروی موئینگی تعریف می‌شود که از لحاظ فیزیکی می‌تواند مفهوم بسیار مهم و مفیدی داشته باشد؛ زیرا با انتخاب این مقدار از پارامتر موئینگی، می‌توان نانوکلیدی را طراحی نمود که تأثیر اثر اندازه بر آن کلید ناچیز باشد.

در حالت دینامیکی پیش از رسیدن تیرک به وضعیت پولین، تیر رفتار حرکتی متناوبی دارد. دامنه ارتعاشات تیر با افزایش نیروهای بین دو الکتروود تا پیش از پدیده پولین، بیشتر می‌شود. در صورت بیشتر شدن نیروهای بین دو الکتروود از مقدار پولین دینامیکی، معادله حرکت تیر پایداری خود را از دست می‌دهد و سامانه از نظر دینامیکی ناپایدار می‌شود.

فهرست علائم

سطح مقطع تیر، μm^2	A
پهنای تیر، μm^2	b
فاصله بین انتهای الکتروود زیرلایه و کلید، m	D_1, D_2
فاصله بی‌بعد بین انتهای الکتروود زیرلایه و کلید	d_1, d_2
مدول الاستیسیته یانگ، GPa	E
نیروی پسماند ناشی از تنش پسماند، N	F_a
نیروی محوری به سبب خمش تیر، N	F_r
فاصله اولیه بین الکتروود و پایه، μm^2	g_0

- of a microelectromechanical system pressure sensor for rehabilitation engineering applications, *International Journal of electronics*, 87(6) (2000) 757-767.
- [16] J.-M. Sallese, W. Grabinski, V. Meyer, C. Bassin, P. Fazan, Electrical modeling of a pressure sensor MOSFET, *Sensors Actuators A: Physical*, 94(1-2) (2001) 53-58.
- [17] K. Chik, Precision wavelength light sources for dense WDM system, in: *High-Speed Semiconductor Lasers for Communication, International Society for Optics and Photonics*, 1997, pp. 56-60.
- [18] L. Jiang, Y. Shi, W. Li, Y. Ding, Z. Lai, Z. Zhu, Numerical analysis of pull-in voltage for contact MEMS switches in switched-line phase shifter application, in: Fifth International Conference on Thin Film Physics and Applications, *International Society for Optics and Photonics*, 2004, pp. 587-591.
- [19] R. Batra, M. Porfiri, D. Spinello, Review of modeling electrostatically actuated microelectromechanical systems, *Smart Materials Structures*, 16(6) (2007) R23.
- [20] R. Nadal-Guardia, A.M. Brosa, A. Dehe, AC transfer function of electrostatic capacitive sensors based on the 1-D equivalent model: application to silicon microphones, *Journal of microelectromechanical systems*, 12(6) (2003) 972-978.
- [21] R. Nadal-Guardia, A.M. Brosa, A. Dehé, Constant charge operation of capacitor sensors based on switched-current circuits, *IEEE sensors journal*, 3(6) (2003) 835-842.
- [22] J. Cheng, J. Zhe, X. Wu, Analytical and finite element model pull-in study of rigid and deformable electrostatic microactuators, *Journal of Micromechanics Microengineering*, 14(1) (2003) 57.
- [23] A.G. Arani, A. Jalilvand, M. Ghaffari, M.T. Mazraehshahi, R. Kolahchi, M. Roudbaria, S. Amira, Nonlinear pull-in instability of boron nitride nano-switches considering electrostatic and Casimir forces, *Scientia Iranica. Transaction F, Nanotechnology*, 21(3) (2014) 1183.
- [24] M.I. Younis, E.M. Abdel-Rahman, A. Nayfeh, A reduced-order model for electrically actuated microbeam-based MEMS, *Journal of Microelectromechanical systems*, 12(5) (2003) 672-680.
- [25] G.W. Vogl, A.H. Nayfeh, A reduced-order model for electrically actuated clamped circular plates, in: ASME 2003 international design engineering technical conferences and computers and information in engineering conference, *American Society of Mechanical Engineers*, 2003, pp. 1867-1874.
- [26] R. Batra, M. Porfiri, D. Spinello, Capacitance estimate for electrostatically actuated narrow microbeams, *IET Micro Nano Letters*, 1(2) (2006) 71-73.
- [1] P. Kim, C.M. Lieber, Nanotube nanotweezers, *Science*, 286(5447) (1999) 2148-2150.
- [2] G.-W. Wang, Y. Zhang, Y.-P. Zhao, G.-T. Yang, Pull-in instability study of carbon nanotube tweezers under the influence of van der Waals forces, *Journal of Micromechanics Microengineering*, 14(8) (2004) 1119.
- [3] G.-W. Wang, Y.-P. Zhao, G.-T. Yang, The stability of a vertical single-walled carbon nanotube under its own weight, *Materials design*, 25(6) (2004) 453-457.
- [4] C.K. Adu, G.U. Sumanasekera, B.K. Pradhan, H.E. Romero, P.C. Eklund, Carbon nanotubes: a thermoelectric nano-nose, *Chemical Physics Letters*, 337(1-3) (2001) 31-35.
- [5] P.G. Collins, K. Bradley, M. Ishigami, d.A. Zettl, Extreme oxygen sensitivity of electronic properties of carbon nanotubes, *science*, 287(5459) (2000) 1801-1804.
- [6] J. Arcamone, G. Rius, G. Abadal, J. Teva, N. Barniol, F. Pérez-Murano, Micro/nanomechanical resonators for distributed mass sensing with capacitive detection, *Microelectronic Engineering*, 83(4-9) (2006) 1216-1220.
- [7] M. Dequesnes, Z. Tang, N. Aluru, Static and dynamic analysis of carbon nanotube-based switches, *Journal of engineering materials technology*, 126(3) (2004) 230-237.
- [8] C.-H. Ke, N. Pugno, B. Peng, H. Espinosa, Experiments and modeling of carbon nanotube-based NEMS devices, *Journal of the Mechanics Physics of Solids*, 53(6) (2005) 1314-1333.
- [9] T. Rueckes, K. Kim, E. Joselevich, G.Y. Tseng, C.-L. Cheung, C.M. Lieber, Carbon nanotube-based nonvolatile random access memory for molecular computing, *science*, 289(5476) (2000) 94-97.
- [10] C. Li, E.T. Thostenson, T.-W. Chou, Sensors and actuators based on carbon nanotubes and their composites: a review, *Composites science technology*, 68(6) (2008) 1227-1249.
- [11] J. Qian, Y.-P. Zhao, Materials selection in mechanical design for microsensors and microactuators, *Materials design*, 23(7) (2002) 619-625.
- [12] S.D. Senturia, *Microsystem design, Springer Science & Business Media*, 2007.
- [13] M. Pedersen, W. Olthuis, P. Bergveld, A silicon condenser microphone with polyimide diaphragm and backplate, *Sensors Actuators A: Physical*, 63(2) (1997) 97-104.
- [14] M. Pederson, W. Olthuis, P. Bergveld, High-performance condenser microphone with fully integrated CMOS amplifier and DC-DC voltage converter, *Journal of microelectromechanical systems*, 7(4) (1998) 387-394.
- [15] J.-J. Ho, Y.-K. Fang, M. Hsieh, S. Ting, G.-S. Chen, M.-S. Ju, T.Y. Chen, C. Huang, C. Chen, Development

- 2(1) (1993) 44-55.
- [40] H.M. Ouakad, M.I. Younis, Modeling and simulations of collapse instabilities of microbeams due to capillary forces, in: ASME 2008 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, *American Society of Mechanical Engineers*, 2008, pp. 187-195.
- [41] E. Yazdanpanahi, A. Noghrehabadi, M. Ghalambaz, Balance dielectric layer for micro electrostatic switches in the presence of capillary effect, *International Journal of Mechanical Sciences*, 74 (2013) 83-90.
- [42] M. Asghari, M. Ahmadian, M. Kahrobaian, M. Rahaeifard, On the size-dependent behavior of functionally graded micro-beams, *Materials Design*, 31(5) (2010) 2324-2329.
- [43] S. Park, X. Gao, Bernoulli–Euler beam model based on a modified couple stress theory, *Journal of Micromechanics Microengineering*, 16(11) (2006) 2355.
- [44] Y. Fu, J. Zhang, Size-dependent pull-in phenomena in electrically actuated nanobeams incorporating surface energies, *Applied Mathematical Modelling*, 35(2) (2011) 941-951.
- [45] S. Kong, S. Zhou, Z. Nie, K. Wang, The size-dependent natural frequency of Bernoulli–Euler micro-beams, *International Journal of Engineering Science*, 46(5) (2008) 427-437.
- [46] F. Yang, A. Chong, D.C.C. Lam, P. Tong, Couple stress based strain gradient theory for elasticity, *International Journal of Solids Structures*, 39(10) (2002) 2731-2743.
- [47] J. Reddy, Nonlocal theories for bending, buckling and vibration of beams, *International Journal of Engineering Science*, 45(2-8) (2007) 288-307.
- [48] A.C. Eringen, Nonlocal continuum field theories, *Springer Science & Business Media*, 2002.
- [49] J. Abdi, A. Koochi, A. Kazemi, M. Abadyan, Modeling the effects of size dependence and dispersion forces on the pull-in instability of electrostatic cantilever NEMS using modified couple stress theory, *Smart Materials Structures*, 20(5) (2011) 055011.
- [50] D.C. Lam, A.C. Chong, Indentation model and strain gradient plasticity law for glassy polymers, *Journal of materials research*, 14(9) (1999) 3784-3788.
- [51] M. Rahaeifard, M. Kahrobaian, M. Asghari, M. Ahmadian, Static pull-in analysis of microcantilevers based on the modified couple stress theory, *Sensors Actuators A: Physical*, 171(2) (2011) 370-374.
- [52] J. Yang, X. Jia, S. Kitipornchai, Pull-in instability of nano-switches using nonlocal elasticity theory, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 41(3) (2008) 035103.
- [53] Y.T. Beni, A. Koochi, M. Abadyan, Theoretical study of
- [27] E. Huang, S. Senturia, Generating efficient dynamics models for microelectromechanical systems from a few finite-element simulations runs, *J. Microelectromech. Syst*, 8 (1999) 280-289.
- [28] E. Yazdanpanahi, A. Noghrehabadi, M. Ghalambaz, Pull-in instability of electrostatic doubly clamped nano actuators: Introduction of a balanced liquid layer (BLL), *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 58 (2014) 128-138.
- [29] G.N. Nielson, G. Barbastathis, Dynamic pull-in of parallel-plate and torsional electrostatic MEMS actuators, *Journal of microelectromechanical systems*, 15(4) (2006) 811-821.
- [30] D. Elata, H. Bamberger, On the dynamic pull-in of electrostatic actuators with multiple degrees of freedom and multiple voltage sources, *Journal of Microelectromechanical systems*, 15(1) (2006) 131-140.
- [31] H.C. Nathanson, W.E. Newell, R.A. Wickstrom, J.R. Davis, The resonant gate transistor, *IEEE Transactions on Electron Devices*, 14(3) (1967) 117-133.
- [32] S. Chatterjee, G. Pohit, A large deflection model for the pull-in analysis of electrostatically actuated microcantilever beams, *Journal of sound vibration*, 322(4-5) (2009) 969-986.
- [33] M.M. Zand, M.T. Ahmadian, Application of homotopy analysis method in studying dynamic pull-in instability of microsystems, *Mechanics Research Communications*, 36(7) (2009) 851-858.
- [34] J. Yang, Y. Hu, S. Kitipornchai, Electro-dynamic behavior of an electrically actuated micro-beam: Effects of initial curvature and nonlinear deformation, *Computers Structures*, 96 (2012) 25-33.
- [35] Y.-G. Wang, W.-H. Lin, Z.-J. Feng, X.-M. Li, Characterization of extensional multi-layer microbeams in pull-in phenomenon and vibrations, *International Journal of Mechanical Sciences*, 54(1) (2012) 225-233.
- [36] Z. Wei, Y.-P. Zhao, Growth of liquid bridge in AFM, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 40(14) (2007) 4368.
- [37] P. Van Zwol, G. Palasantzas, J.T.M. De Hosson, Influence of roughness on capillary forces between hydrophilic surfaces, *Physical Review E*, 78(3) (2008) 031606.
- [38] G. Palasantzas, Contact angle influence on the pull-in voltage of microswitches in the presence of capillary and quantum vacuum effects, *Journal of Applied Physics*, 101(5) (2007) 053512.
- [39] C. Mastrangelo, C. Hsu, Mechanical stability and adhesion of microstructures under capillary forces. II. Experiments, *Journal of Microelectromechanical systems*,

- nonlinear curvature, *Physica E: Low-dimensional Systems Nanostructures*, 66 (2015) 197-208.
- [60] Y. Hayamizu, T. Yamada, K. Mizuno, R.C. Davis, D.N. Futaba, M. Yumura, K. Hata, Integrated three-dimensional microelectromechanical devices from processable carbon nanotube wafers, *Nature nanotechnology*, 3(5) (2008) 289.
- [61] j. Qian, c. Liu, D. Zhang, Y. Zhao, The problem of the residual stress in microelectronic mechanical systems, *Journal Of Mechanical Strength*, 23(4) (2001) 393-401.
- [62] R. Batra, M. Porfiri, D. Spinello, Vibrations of narrow microbeams predeformed by an electric field, *Journal of Sound Vibration*, 309(3-5) (2008) 600-612.
- [63] J.D. Jackson, *Classical electrodynamics*, in, AAPT, 1999.
- [64] R. Legtenberg, H.A. Tilmans, J. Elders, M. Elwenspoek, Stiction of surface micromachined structures after rinsing and drying: model and investigation of adhesion mechanisms, *Sensors actuators A: Physical*, 43(1-3) (1994) 230-238.
- [65] A. Noghrehabadi, A. Haghparast, Dynamic and static pull-in instability analysis of partially affected nano-cantilevers using modified couple stress theory, *Modares Mechanical Engineering*, 16(11) (2017) 81-91 (In Persian).
- [66] A.H. Nayfeh, D.T. Mook, *Nonlinear oscillations*, John Wiley & Sons, 2008.
- [67] J.N. Reddy, *An introduction to the finite element method*, McGraw-hill New York, 1993.
- the effect of Casimir force, elastic boundary conditions and size dependency on the pull-in instability of beam-type NEMS, *Physica E: Low-dimensional Systems Nanostructures*, 43(4) (2011) 979-988.
- [54] M. Rahaeifard, M. Kahrobaiyan, M. Ahmadian, K. Firoozbakhsh, Size-dependent pull-in phenomena in nonlinear microbridges, *International Journal of Mechanical Sciences*, 54(1) (2012) 306-310.
- [55] A.G. Arani, M. Ghaffari, A. Jalilvand, R. Kolahchi, Nonlinear nonlocal pull-in instability of boron nitride nanoswitches, *Acta Mechanica*, 224(12) (2013) 3005-3019.
- [56] S. Pamidighantam, R. Puers, K. Baert, H.A. Tilmans, Pull-in voltage analysis of electrostatically actuated beam structures with fixed-fixed and fixed-free end conditions, *Journal of Micromechanics Microengineering*, 12(4) (2002) 458.
- [57] E.M. Abdel-Rahman, M.I. Younis, A.H. Nayfeh, Characterization of the mechanical behavior of an electrically actuated microbeam, *Journal of Micromechanics Microengineering*, 12(6) (2002) 759.
- [58] H.F. Dadgour, M.M. Hussain, C. Smith, K. Banerjee, Design and analysis of compact ultra energy-efficient logic gates using laterally-actuated double-electrode NEMS, in: *Design Automation Conference (DAC)*, 2010 47th ACM/IEEE, IEEE, 2010, pp. 893-896.
- [59] K. Wang, B. Wang, A general model for nano-cantilever switches with consideration of surface effects and

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

A. Noghrehabadi, A. Haghparast, M. Ghalambaz, Static and Dynamic Pull-in Instabilities Analysis of Partially Affected Clamped Nano Actuators: The Substrate Effect, *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 50(5) (2018) 1023-1038.
DOI: 10.22060/mej.2017.11917.5216

