

طرح جدید تشدیدگر مستطیلی میکرومکانیکی در مد ارتعاشی شناور با ضریب کیفیت بالا و مدهای ناخواسته پایین

ابوالفضل بیجاری^۱، مجید باقری^۲، مهدی راغبی^۳

۱. کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک - طراحی کاربردی، دانشگاه بیرجند

۲. استادیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه بیرجند، a.bijari@birjand.ac.ir

۳. استادیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند

تاریخ دریافت: ۹۳/۶/۱۶ تاریخ پذیرش: ۹۳/۱۲/۱۰

چکیده

امروزه با پیشرفت‌های انجام شده در زمینه ساخت سیستم‌های میکروالکترومکانیکی، این تشدیدگرها در سیستم‌های ارتباطی بی‌سیم و ناوبری کاربرد گسترده‌ای یافته‌اند. در این مقاله، به منظور افزایش ضریب کوپلاژ الکترومکانیکی و بهبود مشخصات الکتریکی تشدیدگرهای تیر، تشدیدگر مستطیلی میکرومکانیکی در مد ارتعاشی شناور معرفی و برای کاهش اثر مدهای ناخواسته در این تشدیدگرها، استفاده از چهار تیر نگهدارنده معمولی پیشنهاد می‌شود. همچنین، با توجه به غالب بودن مکانیزم اتلاف تکیه‌گاه در کاربردهای مهمی نظیر نوسان‌سازها، فیلترها و ژيروسکوپ‌ها، مدل‌سازی و محاسبه اتلاف تکیه‌گاه در تشدیدگر مستطیلی میکرومکانیکی انجام می‌شود و برای اعتبارسنجی از مطالعات آزمایشگاهی استفاده می‌شود. به طوری که نتایج تحلیلی با نتایج آزمایشگاهی مطابقت قابل قبولی داشته و درستی مدل‌سازی انجام شده را نشان می‌دهد. در واقع هدف اصلی این مقاله، ارائه یک طرح جدید برای تیرهای نگهدارنده در مد ارتعاشی شناور تشدیدگرهای مستطیلی میکرومکانیکی به منظور دستیابی به ضریب کیفیت بالا، مقاومت جنبشی پایین و مدهای ناخواسته کم است. برای این منظور، استفاده از چهار تیر نگهدارنده T شکل به جای دو تیر نگهدارنده معمولی پیشنهاد شده و محاسبات انجام شده نشان می‌دهند که ضریب کیفیت تشدیدگر در فرکانس تشدید یکسان در حدود ۱/۶۵ برابر افزایش می‌یابد. همچنین با کاهش پهنا و درازای قسمت‌های T شکل در فرکانس تشدید ثابت، ضریب کیفیت اتلاف تکیه‌گاه افزایش می‌یابد.

کلیدواژه

تشدیدگر مستطیلی میکرومکانیکی، مد شناور، ضریب کیفیت، مدهای ناخواسته، اتلاف تکیه‌گاه

مقدمه

نوسان‌سازها و میکسر-فیلترهای الکتریکی [۴] است؛ زیرا افزایش ضریب کیفیت و کاهش مقاومت جنبشی، تأثیر مستقیمی بر عملکرد این قطعات از نظر اتلاف الحاقی، نویز فاز و کاهش حساسیت سیگنال به نویز دارند. از این رو بررسی مکانیزم‌های اتلاف انرژی و محاسبه‌ی تحلیلی ضریب کیفیت و نیز ارائه ریزساختارهای جدید، برای دستیابی به ضریب کیفیت بالاتر و مقاومت جنبشی کمتر بسیار حائز اهمیت است. چندین مکانیزم عمده اتلاف انرژی نظیر میرایی هوا، میرایی ترموالاستیک و اتلاف تکیه‌گاه، در تشدیدگرهای میکرومکانیکی وجود دارند؛ که ضریب کیفیت را می‌توان برای هر یک از این مکانیزم‌های اتلاف انرژی به تنهایی تعریف کرد. اما زمانی که تمام این مکانیزم‌های اتلاف انرژی با یکدیگر در نظر گرفته شوند؛ ضریب کیفیت مجموع، به صورت رابطه‌ی (۱) تعریف می‌شود:

$$\frac{1}{Q_{total}} = \frac{1}{Q_{Anchor}} + \frac{1}{Q_{TED}} + \frac{1}{Q_{Air}} \quad (1)$$

امروزه تشدیدگرهای میکرومکانیکی به دلیل عملکرد مناسب و کارایی بالا، در حسگرها، سیستم‌های ارتباطی بی‌سیم و ناوبری به شدت توسعه یافته‌اند. ساختار هر تشدیدگر میکرومکانیکی از سه بخش مکانیکی، مبدل‌های تحریک و حسگری تشکیل شده است. در مبدل‌های تحریک، سیگنال الکتریکی توسط یکی از انواع مبدل‌های الکترواستاتیک، پاییزوالکتریک، مغناطیسی و یا حرارتی موجب تحریک ساختار در فرکانس‌های تشدید طبیعی شده و منجر به ارتعاش مکانیکی آن می‌شود؛ که این ارتعاشات مکانیکی توسط مبدل‌های حسگری، حس شده و توسط مدار الکتریکی آشکار می‌شود. برای مثال، در سنسورهای جرمی با قرار گرفتن جرم موردنظر بر روی تشدیدگر، فرکانس تشدید طبیعی آن تغییر کرده و از این طریق جرم مورد نظر تشخیص داده می‌شود. یکی از چالش‌های موجود در طراحی این تشدیدگرها، دستیابی به تشدیدگرهایی با ضریب کیفیت بالا و مقاومت جنبشی پایین برای کاربرد در قطعاتی نظیر فیلترهای الکتریکی [۱]، حسگرها [۲، ۳]،

اتلاف تکیه‌گاه در مد ارتعاشی شناور تشدیدگر مستطیلی میکرومکانیکی با دو تیر نگهدارنده T شکل را به دست آوردند. آن‌ها ابتدا ضریب کیفیت اتلاف تکیه‌گاه در مد ارتعاشی شناور تشدیدگر مستطیلی میکرومکانیکی با دو تیر نگهدارنده قائم را محاسبه و از مطالعات تجربی برای اعتبارسنجی نتایج به دست آمده استفاده کردند. آنها سپس نشان دادند که استفاده از تیرهای نگهدارنده T شکل به جای تیرهای نگهدارنده معمولی باعث افزایش ۱/۵ برابری ضریب کیفیت اتلاف تکیه‌گاه می‌شود [۱۳]. البته در مرجع [۱۳]، اثر مدهای ناخواسته که می‌توانند در نزدیکی مد اصلی ایجاد شوند، بررسی نشده است. در مقاله‌ی حاضر برای افزایش فاصله‌ی فرکانسی میان مد اصلی و مدهای ناخواسته، پس از مدلسازی‌های متعدد در نرم‌افزار المان محدود انسیس^۲، استفاده از طرح تشدیدگر مستطیلی با چهار تیر نگهدارنده پیشنهاد شده و ضریب کیفیت اتلاف تکیه‌گاه آن محاسبه و با طرح‌های دیگر مقایسه می‌شود.

تشدیدگر مستطیلی میکرومکانیکی با دو تیر نگهدارنده

ضریب کوپلاژ الکترومکانیکی یکی از عوامل مهم در تعیین مقاومت جنبشی تشدیدگرهای میکرومکانیکی و نیز مقاومت‌های پایانه‌دهی و اتلاف الحاقی فیلترهای میکرومکانیکی است [۱۴]. همچنین این پارامتر بر روی نویز فاز ایجاد شده در نوسان‌سازهای میکرومکانیکی تاثیر مستقیم دارد [۱۵]. به طوری که با افزایش ضریب کوپلاژ الکترومکانیکی، مقاومت جنبشی، اتلاف الحاقی و نویز فاز کاهش می‌یابند. در واقع، یکی از مشکلات عمده تشدیدگرهای تیر، پایین بودن ضریب کوپلاژ الکترومکانیکی به دلیل پایین بودن سطح همپوشانی مبدل‌های تحریک و حسگری با ساختار تشدیدگر، مطابق رابطه زیر است:

$$\eta = V_p \frac{\partial C}{\partial x} \quad (2)$$

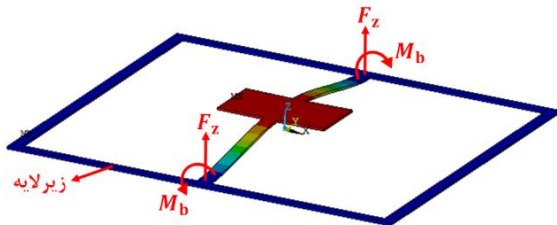
در رابطه‌ی (۲)، C ظرفیت خازنی ایجاد شده در مبدل‌های تحریک و حسگری و V_p ولتاژ بایاس DC اعمال شده به ساختار تشدیدگر است. در شکل ۱، شکل شماتیک تشدیدگر تیر و تشدیدگر مستطیلی با دو تیر نگهدارنده رسم شده است.

که Q_{Anchor} ضریب کیفیت اتلاف تکیه‌گاه، Q_{TED} ضریب کیفیت میرایی ترموالاستیک و Q_{Air} ضریب کیفیت میرایی هوا است [۵]. به طور معمول ضریب کیفیت یک تشدیدگر میکرومکانیکی با توجه به نوع کاربرد و فرکانس ارتعاش آن، توسط مکانیزم اتلاف انرژی غالب تعیین می‌شود. در تشدیدگرهای میکرومکانیکی عملیاتی در فرکانس‌های VHF و UHF به دلیل اندازه کوچک و سهولت بسته‌بندی تشدیدگر در خلاء بالا، به طور معمول از دو مکانیزم میرایی هوا و میرایی ترموالاستیک صرف نظر شده و در نتیجه ضریب کیفیت این تشدیدگرها توسط مکانیزم اتلاف تکیه‌گاه تعیین می‌شود [۶-۷]. اتلاف تکیه‌گاه در واقع بخشی از انرژی ارتعاشی تشدیدگر است که از طریق تیرهای نگهدارنده به زیرلایه^۱ منتقل می‌شود؛ و به همین دلیل در مدل‌سازی این مکانیزم اتلاف، تمام قسمت‌های یک تشدیدگر میکرومکانیکی شامل ساختار تشدیدگر، تیرهای نگهدارنده و زیرلایه باید تحلیل و مدل‌سازی شوند. در تحلیل این اتلاف انرژی فرض می‌شود که ابعاد زیرلایه نیمه نامحدود بوده و در مقایسه با ابعاد تشدیدگر به اندازه کافی بزرگ است. بنابراین، زمانی که موجی به زیرلایه وارد می‌شود به مرزی برخورد نکرده تا دوباره به تشدیدگر بازگردد، و در نتیجه تمام انرژی ارتعاشی وارد شده به زیرلایه تلف می‌شود [۸]. وانگ و همکاران، اتلاف تکیه‌گاه در تشدیدگر جرمی تکان‌دهنده‌ی مربعی را بررسی کردند. آن‌ها روابط ضریب کیفیت اتلاف تکیه‌گاه را برای مد پیچشی، مد تکان‌دهنده‌ی خارج صفحه و ترکیب این دو مد، استخراج کردند [۹]. هائو و همکاران نیز یک مدل تحلیلی را برای اتلاف تکیه‌گاه تشدیدگرهای تیر در حالت‌های گیردار-آزاد (C-F) و گیردار-گیردار (C-C) که تحت ارتعاشات خمشی درون صفحه‌ای قرار دارند، ارائه کردند [۱۰]. همچنین، هائو و همکاران، اتلاف تکیه‌گاه در تشدیدگر میکرومکانیکی دیسکی با تکیه‌گاه مرکزی را تحت مد حجمی شعاعی مدل و دید خوبی در زمینه انتخاب ابعاد و ماده‌ی سازنده مناسب جهت دستیابی به بالاترین ضریب کیفیت فراهم کردند [۱۱]. ژاؤ و همکاران، اتلاف انرژی در نقاط اتصال تشدیدگرهای تیر یک‌سر گیردار و دو سر گیردار به تکیه‌گاه را برای دو حالت متفاوت تکیه‌گاه و با در نظر گرفتن تکیه‌گاه به صورت یک واسطه الاستیک نیمه بی‌نهایت، بررسی کردند [۸]. هاوک و همکاران، اتلاف انرژی در تشدیدگر مستطیلی میکرومکانیکی با دو تیر نگهدارنده قائم را در دماهای مختلف به صورت تجربی بررسی کرده و وابستگی ضریب کیفیت پنج مد ارتعاشی تشدیدگر مستطیلی میکرومکانیکی به دما را نشان دادند [۱۲]. همچنین باقری و همکاران رابطه‌ی تحلیلی ضریب کیفیت

در رابطه (۳)، فرکانس طبیعی تشدیدگر، U کل انرژی ارتعاشی تشدیدگر و تیرهای نگهدارنده در یک سیکل ارتعاش، ΔU مجموع انرژی تلف شده در هر سیکل ارتعاش و Π توان خالص جریان انرژی خروجی از تشدیدگر است که توسط نیروهای وارده به زیرلایه از طرف تشدیدگر تعیین می‌شود. در شکل (۲) مد شناور تشدیدگر مستطیلی میکرومکانیکی با دو تیر نگهدارنده قائم و نیروی برشی و ممان خمشی وارده به زیرلایه در مد شناور تشدیدگر مستطیلی میکرومکانیکی با دو تیر نگهدارنده قائم نشان داده است. که نیروی برشی F_z و گشتاور خمشی M_b در سمت گیردار تیرهای نگهدارنده (نیروی برشی و گشتاور خمشی وارده به زیرلایه) از روابط (۴) و (۵) به دست می‌آیند [۱۶]:

$$F_z = \frac{12EI_x a}{L^3} \quad (4)$$

$$M_b = \frac{6EI_x a}{L^2} \quad (5)$$

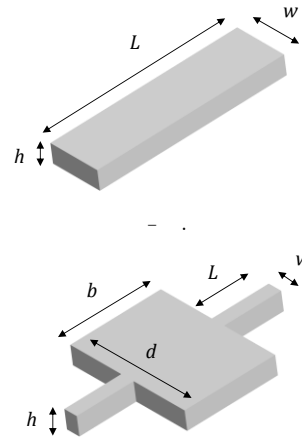


شکل ۲. نیروهای وارد شده به زیرلایه از طرف تیرهای نگهدارنده تشدیدگر مستطیلی میکرومکانیکی در مد ارتعاشی شناور

در روابط (۴) و (۵)، a تغییر مکان سر آزاد تیرهای نگهدارنده یعنی محل اتصال تیر به تشدیدگر (تغییر مکان تشدیدگر) بوده و I_x طبق رابطه (۶) محاسبه می‌شود:

$$I_x = \frac{1}{12} wh^3 \quad (6)$$

همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، نیروهای وارد شده به زیرلایه از طرف تشدیدگر فاقد نیروی محوری است. زیرا نیروی محوری در تیرهای نگهدارنده زمانی به‌وجود می‌آید که تیرهای نگهدارنده در راستای طولی تغییر مکان داشته باشند و این امر مستلزم این است که ابعاد تشدیدگر در حین ارتعاش در مد شناور تغییر کند. همانطور که در شکل‌های ۳ و ۴ مشاهده می‌شود، مدلسازی و نحوه تغییر شکل تشدیدگر در مد شناور نشان می‌دهد که تشدیدگر در این مد تغییر ابعادی نداشته و فقط در راستای محور z تغییر مکان می‌دهد؛ به طوری که این تغییر مکان باعث ایجاد نیروی برشی و ممان خمشی در تیرهای نگهدارنده می‌شود. بنابراین، در شرایط مرزی تیرهای نگهدارنده شرط تغییر مکان در راستای محور x وجود ندارد و در نتیجه نیرویی نیز در راستای محور x یا همان نیروی محوری در تیرهای نگهدارنده وجود نخواهد داشت. همچنین، در مراجع [۸، ۱۷] نیز از اثر نیروی



شکل ۱. طرح شماتیک (الف) تشدیدگر تیر میکرومکانیکی (ب) تشدیدگر مستطیلی میکرومکانیکی

در شکل ۱، b و d به ترتیب پهنا و درازای ناحیه همپوشانی با مبدل‌ها هستند. همچنین، L و w به ترتیب درازا و پهنای تیرهای نگهدارنده می‌باشند. ضخامت تیرهای نگهدارنده و ساختار تشدیدگر نیز یکسان و برابر h فرض می‌شود. با توجه به رابطه (۲)، برای جلوگیری از اعمال ولتاژهای بایاس DC بزرگ به ساختار، استفاده از تشدیدگرهای تیر با پهنای بالا تنها راه افزایش ضریب کوپلاژ الکترومکانیکی است. اما در این تشدیدگرها به دلیل رابطه معکوس ضریب کیفیت اتلاف تکیه‌گاه با پهنای تیر [۱۱]، میان ضریب کوپلاژ الکترومکانیکی و ضریب کیفیت تشدیدگر تیر مصالحه وجود دارد. برای حل این مشکل، می‌توان از مد شناور تشدیدگرهای مستطیلی به جای مد شناور تشدیدگرهای تیر مطابق شکل ۱ استفاده کرد. در واقع در تشدیدگر مستطیلی میکرومکانیکی می‌توان ناحیه همپوشانی مبدل‌های تحریک و حسگری با ساختار تشدیدگر را بدون افزایش پهنای تیرهای نگهدارنده، افزایش داد. برای این منظور، ابتدا مقدار ضریب کیفیت اتلاف تکیه‌گاه در مد ارتعاشی خمشی تشدیدگر تیر و مد ارتعاشی شناور تشدیدگر مستطیلی با دو تیر نگهدارنده قائم، در فرکانس‌های تشدید یکسان با یکدیگر مقایسه شده و سپس ساختار جدیدی برای کاهش اثر مدهای ناخواسته در تشدیدگر مستطیلی پیشنهاد می‌شود.

ضریب کیفیت تشدیدگر مستطیلی میکرومکانیکی با دو تیر نگهدارنده قائم، توسط نویسندگان [۱۳] با استفاده از رابطه کلی زیر محاسبه شده است:

$$\frac{1}{Q} = \frac{\Delta U}{2\pi U} = \frac{\Pi}{\omega U} \quad (3)$$

خمشی M_b (Π_{M_b}) و مجموع توان‌های ناشی از این نیروها به صورت زیر محاسبه می‌شوند [۱۳]:

$$\Pi_{F_z} = \sqrt{3(1-\nu^2)} \frac{y_{33} F_z^2}{h_p^2 \sqrt{E\rho}} \quad (10)$$

$$\Pi_{M_b} = 6(1-\nu^2) \frac{y_{22} \omega M_b^2}{h_p^3 E} \quad (11)$$

$$\Pi_{M_t} = 6(1-\nu^2) \frac{y_{11} \omega M_t^2}{h_p^3 E} \quad (12)$$

$$\Pi_{M_b+F_z} = \Pi_{M_b} + \Pi_{F_z}$$

$$+ (12(1-\nu^2))^{\frac{3}{4}} y_{23} \frac{\sqrt{\omega} M_b F_z}{\rho^{\frac{1}{4}} h_p^{\frac{5}{2}} E^{\frac{3}{4}}} \quad (13)$$

$$\Pi_{M_t+M_b} = \Pi_{M_b} + \Pi_{M_t} \quad (14)$$

$$\Pi_{M_t+F_z} = \Pi_{M_t} + \Pi_{F_z} \quad (15)$$

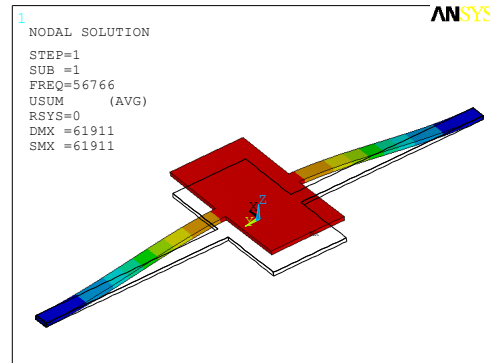
$$\begin{aligned} & \Pi_{M_t+M_b+F_z} \\ &= 6(1-\nu^2) \frac{y_{11} \omega M_t^2}{E h_p^3} \\ &+ 6(1-\nu^2) \frac{y_{22} \omega M_b^2}{E h_p^3} \\ &+ \sqrt{3(1-\nu^2)} \frac{y_{33} F_z^2}{\sqrt{E\rho} h_p^2} \\ &+ (12(-\nu^2))^{\frac{3}{4}} \frac{y_{23} \sqrt{\omega} M_b F_z}{\rho^{\frac{1}{4}} E^{\frac{3}{4}} h_p^{\frac{5}{2}}} \end{aligned} \quad (16)$$

در روابط فوق، h_p ضخامت زیرلایه است و ضرایب y_i آرایه‌های ماتریس ادمیتانس هستند. همانطور که در رابطه (۹) مشاهده می‌شود، برای محاسبه‌ی توان خالص جریان انرژی خروجی از تشدیدگر، بخش حقیقی آرایه‌های ماتریس ادمیتانس مورد نیاز است؛ که در جدول ۱ ارائه شده‌اند. نوع ماده ساختاری نیز سیلیکون تک‌بلور با مشخصات ارائه شده در جدول ۲ می‌باشد.

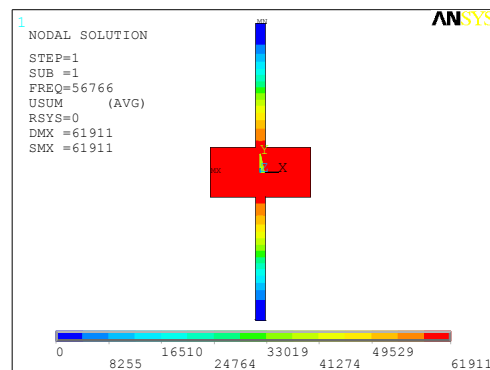
جدول ۱. مقادیر حقیقی آرایه‌های ماتریس ادمیتانس [۵، ۱۸]

ضرایب	$\nu=0/28$	$\nu=0/3$
$\text{Re}(y_{11}) = \text{Re}(y_{22})$	$0/22172$	$0/21645$
$\text{Re}(y_{23}) = \text{Re}(y_{32})$	$-0/28546$	$-0/29149$
$\text{Re}(\square_{\square})$	$0/45735$	$0/46198$

محوری در مقایسه با نیروی برشی، ممان خمشی و ممان پیچشی در محاسبات مربوط به ضریب کیفیت و آرایه‌های ماتریس ادمیتانس صرف‌نظر شده است.



شکل ۳. نحوه‌ی تغییر شکل تشدیدگر در مد شناور



شکل ۴. نحوه‌ی تغییر شکل تشدیدگر در مد شناور از نمای بالا

اکنون با توجه به رابطه (۲)، برای محاسبه فرکانس طبیعی، از روش سختی معادل و جرم مؤثر استفاده می‌شود؛ و برای محاسبه انرژی ارتعاشی جذب شده و توان خالص جریان انرژی خروجی از تشدیدگر، نیروهای برشی و گشتاورهای پیچشی میان تشدیدگر و زیرلایه محاسبه می‌شوند [۱۳]:

$$\omega_{pr} = \sqrt{\frac{\frac{2E wh^3}{L^3}}{\rho hdb + \frac{26}{35} \rho whL}} \quad (7)$$

$$U_{pr} = \frac{E wh^3 a^2}{L^3} \quad (8)$$

$$\Pi = \frac{1}{2} \text{Re}(F \cdot V) \quad (9)$$

که Re نشان دهنده‌ی قسمت حقیقی است. با توجه به رابطه (۹)، توان انتقال یافته برای نیروی برشی F_z (Π_{F_z})، توان انتقال یافته برای ممان پیچشی M_t (Π_{M_t})، توان انتقال یافته برای ممان

جدول ۲. مشخصات فیزیکی و مکانیکی ماده‌ی ساختاری تشدیدگر، تیرهای

نگهدارنده و زیرلایه [۹]

ν	E (GPa)	ρ (kg/m ³)
۰/۲۸	۱۳۱	۲۳۳۰

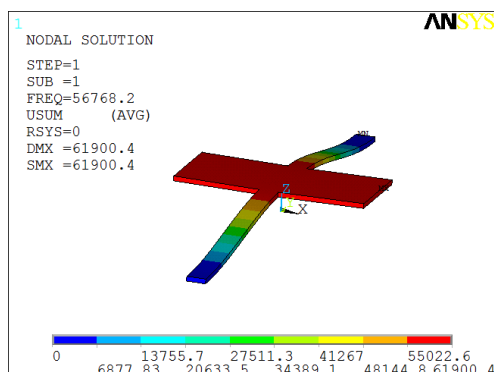
با جایگذاری روابط (۷)، (۸) و (۱۳) در رابطه‌ی (۳)، رابطه‌ی ضریب کیفیت اتلاف تکیه‌گاه برای مد شناور تشدیدگر مستطیلی با دو تیر نگهدارنده قائم، به دست می‌آید [۱۳]:

$$\frac{l}{Q_{pr}} = \frac{2(\Pi_{M_b+F_z})}{\omega_{pr} U_{pr}} = \frac{2\sqrt{3(1-\nu^2)} \sqrt{dbL + \frac{26}{35} wL^2} \sqrt{wy_{33}} h^2}{\sqrt{2} h_p^2 L^2} + \frac{3(1-\nu^2) y_{22} w h^3}{L h_p^3} + \frac{5.42(1-\nu^2)^{\frac{3}{4}} y_{23} h^{\frac{5}{2}} w^{\frac{3}{4}} (dbL + \frac{26}{35} wL^2)^{\frac{1}{4}}}{h_p^{\frac{5}{2}} L^{\frac{3}{2}}} \quad (17)$$

در جدول ۳، مقادیر ضریب کیفیت اتلاف تکیه‌گاه در مد شناور تشدیدگر تیر و تشدیدگر مستطیلی با دو تیر نگهدارنده‌ی قائم در فرکانس تشدید یکسان، با یکدیگر مقایسه شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در فرکانس‌های ارتعاش یکسان، مقادیر ضریب کیفیت اتلاف تکیه‌گاه در مد ارتعاشی شناور تشدیدگر مستطیلی حدود ۱/۲۲ برابر ضریب کیفیت اتلاف تکیه‌گاه تشدیدگر تیر می‌باشند. بنابراین، استفاده از تشدیدگرهای مستطیلی علاوه بر افزایش ضریب کوپلاژ الکترومکانیکی، منجر به افزایش ضریب کیفیت قابل دسترس می‌شود. در نتیجه، مزیت تشدیدگر مستطیلی با دو تیر نگهدارنده‌ی قائم نسبت به تشدیدگر تیر را می‌توان دارا بودن ضریب کیفیت بالاتر، مقاومت جنبشی پایین‌تر و در نتیجه نویز فاز کمتر و نیاز به مقاومت‌های پایان‌دهی کوچکتر در کاربردهای الکترونیکی بیان کرد. اما یکی از مشکلات موجود در این تشدیدگرها، احتمال ایجاد مدهای ناخواسته در نزدیکی مد اصلی است.

جدول ۳. مقایسه بین ضریب کیفیت اتلاف تکیه‌گاه در مد ارتعاشی شناور تشدیدگر تیر و تشدیدگر مستطیلی میکرومکانیکی با دو تیر نگهدارنده‌ی قائم

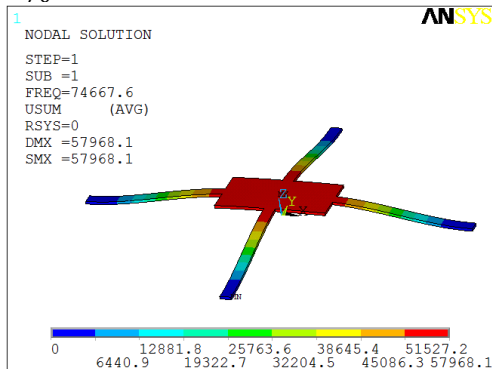
فرکانس ارتعاش (kHz)	نوع تشدیدگر	h (μm)	w (μm)	L (μm)	b (μm)	d (μm)	h_p (μm)	ضریب کیفیت
۱۶۴/۵	تیر آزمایشگاهی [۱۹]	۵/۵	۲۰	۵۰۰	-	-	۳۷۵	۶۰۴۰۰
	تیر تحلیلی	۵/۵	۲۰	۵۰۰	-	-	۳۷۵	۶۱۷۰۰
	مستطیلی	۵/۵	۲۰	۲۳۹/۹۴	۳۰	۳۵	۳۷۵	۶۲۷۲۰
۱۹۸	تیر آزمایشگاهی [۱۹]	۶/۵	۲۰	۵۰۰	-	-	۳۷۵	۳۵۰۰۰
	تیر تحلیلی	۶/۵	۲۰	۵۰۰	-	-	۳۷۵	۳۶۶۵۰
	مستطیلی	۶/۵	۲۰	۲۳۷/۶	۳۰	۳۵	۳۷۵	۴۵۱۰۰
۲۱۷	تیر آزمایشگاهی [۱۹]	۷/۵	۲۰	۵۰۰	-	-	۳۷۵	۲۷۰۰۰
	تیر تحلیلی	۷/۵	۲۰	۵۰۰	-	-	۳۷۵	۲۷۹۰۰
	مستطیلی	۷/۵	۲۰	۲۴۴/۱۴	۳۰	۳۵	۳۷۵	۳۵۴۳۰



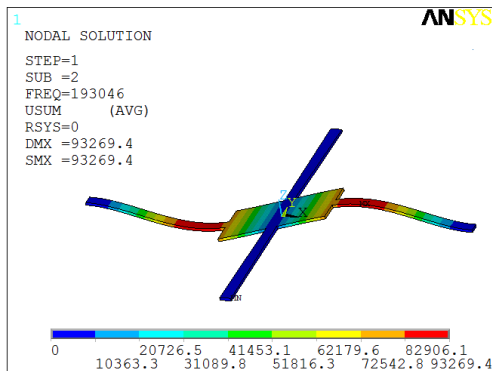
(الف)

مطابق شکل ۵، در تشدیدگر مستطیلی با دو تیر نگهدارنده قائم، فاصله فرکانسی مدهای اول (مد مورد نظر) $f = 56/77$ kHz و مد دوم (مد ناخواسته) $f = 97/7$ kHz بسیار به یکدیگر نزدیک هستند که این امر می‌تواند گزینندگی و حساسیت تشدیدگر میکرومکانیکی را در کاربردهای مخابراتی و حسگری کاهش دهد [۲۰]. بنابراین، استفاده از تشدیدگر مستطیلی میکرومکانیکی با چهار تیر نگهدارنده پیشنهاد می‌شود.

$$m_f = \frac{26}{70} \rho whL \quad (19)$$

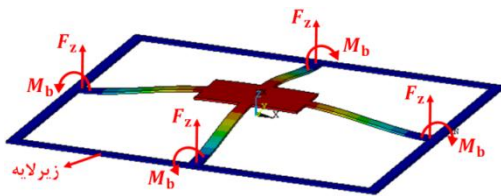


(الف)



(ب)

شکل ۷. الف- مد ارتعاشی شناور (مد اول)، ب- مد ارتعاشی پیچشی و تکان دهنده‌ی خارج صفحه (مد دوم) در تشدیدگر مستطیلی میکرومکانیکی با دو تیر نگهدارنده قائم و ابعاد $L=250 \mu\text{m}$ و $w=20 \mu\text{m}$ $h=5 \mu\text{m}$ $b=100 \mu\text{m}$ $d=200 \mu\text{m}$



شکل ۸. نیروی برشی و ممان خمشی وارد به زیرلایه از طرف تیرهای نگهدارنده در مد ارتعاشی شناور تشدیدگر مستطیلی میکرومکانیکی با چهار تیر نگهدارنده

در نتیجه جرم مؤثر به صورت رابطه (۲۰) قابل محاسبه است:

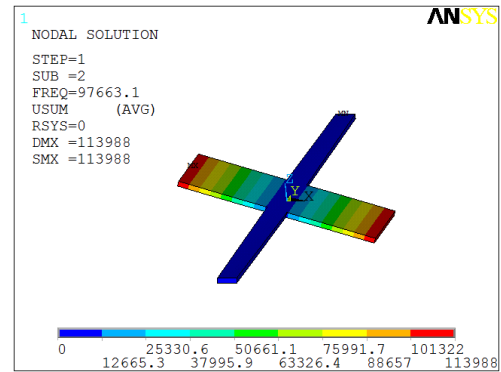
$$m_{eff-p-4} = m + 4m_f = phbd + \frac{52}{35} \rho whL \quad (20)$$

فرکانس تشدید نیز از رابطه‌ی (۲۱) محاسبه می‌شود:

$$\omega_{p-4} = \sqrt{\frac{K_{p-4}}{m_{eff-p-4}}} = \sqrt{\frac{\frac{4Ewh^3}{L^3}}{phbd + \frac{52}{35} \rho whL}} \quad (21)$$

انرژی ارتعاشی تشدیدگر و تیرهای نگهدارنده را می‌توان از رابطه (۲۲) محاسبه کرد:

$$U_{p-4} = \frac{1}{2} m_{eff-p-4} (\omega_{p-4} a)^2 = \frac{2Ewh^3 a^2}{L^3} \quad (22)$$

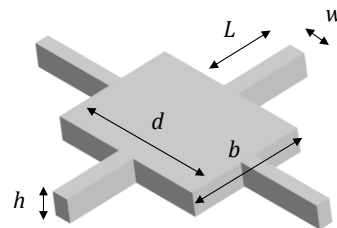


(ب)

شکل ۵. الف) مد ارتعاشی شناور (مد اول)، ب) مد ارتعاشی پیچشی (مد دوم) در تشدیدگر مستطیلی میکرومکانیکی با دو تیر نگهدارنده قائم و ابعاد $L=250 \mu\text{m}$ و $w=20 \mu\text{m}$ $h=5 \mu\text{m}$ $b=100 \mu\text{m}$ $d=200 \mu\text{m}$

تشدیدگر مستطیلی با چهار تیر نگهدارنده

شکل ۶، تشدیدگر مستطیلی میکرومکانیکی با چهار تیر نگهدارنده قائم و ابعاد یکسان را نشان می‌دهد.



شکل ۶. شماتیک تشدیدگر مستطیلی میکرومکانیکی با چهار تیر نگهدارنده با توجه به نتایج تحلیل مدی نرم افزار انسیس که در شکل ۷ ارائه شده، مشاهده می‌شود که استفاده از این آرایش منجر به افزایش فاصله فرکانسی میان مد ارتعاشی شناور (مد اول) $f=74667 \text{ KHz}$ و مد دوم (ناخواسته) $f=193046 \text{ KHz}$ می‌شود. بنابراین، مدل‌سازی و محاسبه ضریب کیفیت تشدیدگر مستطیلی با چهار تیر نگهدارنده قائم، برای ایجاد دید کافی در زمینه طراحی تشدیدگرهایی با ضریب کیفیت بالا و مدهای ناخواسته پایین ضروری می‌باشد. برای این منظور، از رابطه کلی (۳) و مدل‌سازی نیروها و گشتاورهای اعمال شده به زیر لایه مطابق شکل ۸ استفاده می‌شود. برای محاسبه‌ی فرکانس طبیعی ساختار از روش سختی معادل و جرم مؤثر استفاده شده و سختی معادل آن از رابطه‌ی (۱۸) محاسبه می‌شود:

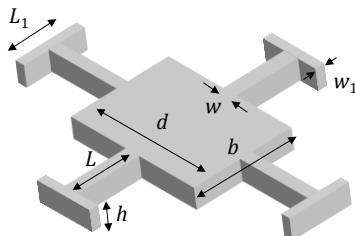
$$K_{p-4} = \frac{4Ewh^3}{L^3} \quad (18)$$

جرم مؤثر این ساختار ترکیب جرم تشدیدگر و جرم مؤثر تیرهای نگهدارنده است. جرم مؤثر تیرهای تحت خمش به صورت رابطه (۱۹) محاسبه می‌شود [۱۶]:

تشدیدگر مستطیلی میکرومکانیکی با چهار تیر نگهدارنده

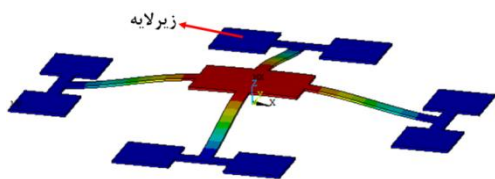
شکل T

شکل شماتیک تشدیدگر مستطیلی میکرومکانیکی با چهار تیر نگهدارنده‌ی T شکل، در شکل ۹ نشان داده شده است.



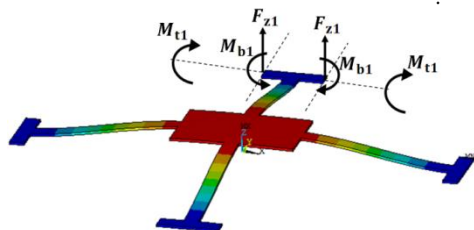
شکل ۹. شکل شماتیک تشدیدگر مستطیلی میکرومکانیکی با چهار تیر نگهدارنده‌ی T شکل

شکل ۹. شکل شماتیک تشدیدگر مستطیلی میکرومکانیکی با چهار تیر نگهدارنده‌ی T شکل. فرض شده که ضخامت تیرهای نگهدارنده و ساختار تشدیدگر یکسان هستند. شکل ۱۰ نشان دهنده‌ی مد اول ارتعاش تشدیدگر مستطیلی میکرومکانیکی با چهار تیر نگهدارنده‌ی T شکل یعنی مد ارتعاشی شناور و نحوه‌ی اتصال تشدیدگر به زیرلایه است.



شکل ۱۰. مد اول ارتعاش تشدیدگر مستطیلی میکرومکانیکی با چهار تیر نگهدارنده‌ی T شکل و نحوه‌ی اتصال تشدیدگر به زیرلایه

در شکل ۱۰ چهار تیر تحت خمش قرار گرفته‌اند و تشدیدگر تغییر مکانی در راستای محور z دارد. نیروی برشی، گشتاور خمشی و گشتاور پیچشی وارده به زیرلایه در مد ارتعاشی شناور تشدیدگر مستطیلی میکرومکانیکی با چهار تیر نگهدارنده‌ی T در شکل ۱۱ نشان داده شده است. در شکل ۱۱ نیرو و ممان برای یک تیر رسم شده است و برای سه تیر دیگر نیز نیروهای برشی و ممان‌ها به صورت مشابه هستند.



شکل ۱۱. نیروی برشی، ممان خمشی و ممان پیچشی وارد به زیرلایه از طرف تیرهای نگهدارنده در مد ارتعاشی شناور تشدیدگر مستطیلی میکرومکانیکی با چهار تیر نگهدارنده‌ی T شکل

با در نظر گرفتن سیلیکون تک‌بلور به عنوان ماده سازنده ساختار، مقادیر فرکانس‌های طبیعی به دست آمده از روش المان محدود نرم‌افزار انسیس و روش تحلیلی، در سه مورد مختلف با یکدیگر در جدول ۴ مقایسه شده‌اند.

جدول ۴. مقایسه نتایج تحلیلی و شبیه‌سازی نرم‌افزار المان محدود انسیس در مد ارتعاشی شناور تشدیدگر مستطیلی میکرومکانیکی با چهار تیر نگهدارنده

مشخصات	نمونه ۱	نمونه ۲	نمونه ۳
h (μm)	۵/۵	۶/۵	۷/۵
w (μm)	۲۰	۲۰	۲۰
L (μm)	۲۳۹/۹۴	۲۳۷/۶	۲۴۴/۱۴
b (μm)	۳۰	۳۰	۳۰
d (μm)	۳۵	۳۵	۳۵
فرکانس تحلیلی (kHz)	۱۷۴/۷۴	۲۱۰/۴۶	۲۳۰/۴
فرکانس انسیس (kHz)	۱۶۹/۰۳	۲۰۳/۴۳	۲۲۲/۷۲
درصد خطا	۳/۳	۳/۳۴	۳/۳۳

جدول ۴ نشان می‌دهد که نتایج تحلیلی مطابقت خوبی با نتایج شبیه‌سازی المان محدود انسیس داشته و سختی معادل و جرم مؤثر تشدیدگر مستطیلی میکرومکانیکی با چهار تیر نگهدارنده در مد شناور، به درستی استخراج شده‌اند. با جایگذاری روابط (۱۳)، (۲۱) و (۲۲) در رابطه‌ی (۳) و استفاده از روابط (۴) و (۵) رابطه‌ی ضریب کیفیت اتلاف تکیه‌گاه برای مد شناور تشدیدگر مستطیلی میکرومکانیکی با چهار تیر نگهدارنده قائم به صورت رابطه‌ی (۲۳) به دست می‌آید:

$$\frac{1}{Q_{p-4}} = \frac{4(\Pi_{M_b+F_z})}{\omega_{p-4} U_{p-4}}$$

$$= \frac{\sqrt{3(1-v^2)} \sqrt{dbL + \frac{52}{35} wL^2} \sqrt{w y_{33} h^2}}{h_p^2 L^2} + \frac{3(1-v^2) y_{22} w h^3}{L h_p^3} + \frac{4.56(1-v^2)^{\frac{3}{4}} y_{23} h^{\frac{5}{2}} w^{\frac{3}{4}} (dbL + \frac{52}{35} wL^2)^{\frac{1}{4}}}{h_p^{\frac{5}{2}} L^{\frac{3}{2}}}$$

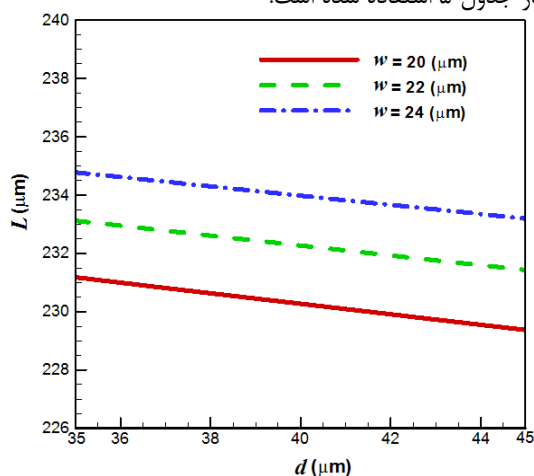
همانطور که در رابطه (۲۳) مشاهده می‌شود، مقدار نیرو و ممان در تکیه‌گاه تاثیر مستقیمی بر ضریب کیفیت اتلاف تکیه‌گاه دارند بنابراین در این مقاله برای کاهش نیرو و ممان در تکیه‌گاه، استفاده از طرح تشدیدگر مستطیلی میکرومکانیکی با چهار تیر نگهدارنده‌ی T شکل پیشنهاد می‌شود.

به نیروی برشی معادل که بر روی تشدیدگر عمل می‌کند بستگی دارد و اضافه کردن قسمت T شکل تغییری در نیروی برشی معادل که بر روی تشدیدگر عمل می‌کند، ایجاد نمی‌کند.

جدول ۵. مقایسه نتایج تحلیلی و شبیه‌سازی برای فرکانس تشدید در مد ارتعاشی شناور تشدیدگر مستطیلی با چهار تیر نگهدارنده‌ی T شکل

مشخصات	نمونه ۱	نمونه ۲	نمونه ۳
h (μm)	۵/۵	۶/۵	۷/۵
w (μm)	۲۰	۲۰	۲۰
L (μm)	۲۳۹/۹۴	۲۳۷/۶	۲۴۴/۱۴
b (μm)	۳۰	۳۰	۳۰
d (μm)	۳۵	۳۵	۳۵
$L1$ (μm)	۵۰	۵۰	۵۰
$w1$ (μm)	۱۲	۱۲	۱۳
فرکانس تحلیلی (kHz)	۱۵۲/۲۱	۱۸۳/۱۴	۲۰۱/۰۷
فرکانس انسیس (kHz)	۱۵۱	۱۸۰/۹۸	۱۹۹/۵۲
درصد خطا	۰/۸	۱/۱۸	۰/۷۷

بنابراین، سختی معادل برابر با حالتی است که از تیرهای معمولی استفاده می‌شود و در نتیجه انرژی ارتعاشی در دو حالت استفاده از تیرهای معمولی و تیرهای T شکل با یکدیگر برابر است. با مقایسه بین فرکانس انسیس در جدول ۵ و جدول ۴ مشاهده می‌شود که فرکانس تغییر محسوسی داشته و این نشان می‌دهد که با توجه به ثابت بودن سختی، جرم قسمت T شکل در محاسبه‌ی فرکانس نقش دارد. در مقاله‌ی حاضر جرم مؤثر قسمت T شکل با جرم آن تقریب زده شده است و جدول ۵ نیز نشان می‌دهد این تقریب درست بوده است. در شکل ۱۲ کانتور فرکانس مد شناور تشدیدگر مستطیلی با چهار تیر نگهدارنده‌ی T شکل به ازای تغییرات درازای تشدیدگر و مقادیر متناظر طول تیرهای نگهدارنده در فرکانس تشدید ثابت، به ازای سه مقدار پهنای تیرهای نگهدارنده رسم شده است. در ادامه برای رسم کانتورها و شکل‌ها فرکانس از ابعاد نمونه ۱ در جدول ۵ استفاده شده است.



شکل ۱۲. کانتور فرکانس مد شناور تشدیدگر مستطیلی میکرومکانیکی به ازای تغییرات درازای تشدیدگر و طول تیرهای نگهدارنده

نیروی برشی F_{z1} ، گشتاور خمشی M_{b1} و گشتاور پیچشی M_{t1} در سمت گیردار تیرهای نگهدارنده (نیروی برشی، گشتاور خمشی و گشتاور پیچشی وارده به زیرلایه) از روابط (۲۴)–(۲۶) به دست می‌آیند:

$$F_{z1} = \frac{Ewh^3a}{2L^3} \quad (24)$$

$$M_{b1} = \frac{Ewh^3L_1a}{8L^3} \quad (25)$$

$$M_{t1} = \frac{Ewh^3(L+w_1)a}{4L^3} \quad (26)$$

از وزن قسمت T شکل در مقایسه با نیروی برشی F_z صرف نظر شده است.

محاسبه فرکانس تشدید و انرژی ارتعاشی تشدیدگر

برای محاسبه‌ی فرکانس تشدید، سختی معادل مورد نیاز از رابطه‌ی (۱۸) محاسبه می‌شود. همچنین، جرم مؤثر ساختار ارائه شده، از ترکیب جرم تشدیدگر، جرم مؤثر قسمت‌های T شکل و جرم مؤثر تیرهای نگهدارنده محاسبه می‌شود. جرم مؤثر تیرهای تحت خم از رابطه (۱۹) محاسبه شده و در نتیجه جرم مؤثر به‌صورت رابطه (۲۷) قابل محاسبه است:

$$m_{eff-p-T} = \rho hbd + \frac{52}{35}\rho whL + 4phw_1L_1 \quad (27)$$

بنابراین، فرکانس تشدید از رابطه‌ی (۲۸) محاسبه می‌شود:

$$\omega_{p-T} = \sqrt{\frac{K_{p-4}}{m_{eff-p-T}}} \quad (28)$$

$$= \sqrt{\frac{\frac{4Ewh^3}{L^3}}{\rho hbd + \frac{52}{35}\rho whL + 1.48phw_1L_1}}$$

و انرژی ارتعاشی تشدیدگر و تیرهای نگهدارنده از رابطه (۲۲) محاسبه می‌شود.

مقایسه فرکانس تشدید در نتایج تحلیلی و شبیه‌سازی

نوع ماده در نظر گرفته شده برای تیرهای نگهدارنده، زیرلایه و تشدیدگر سیلیکون تک‌بلور است که مشخصات آن در جدول ۱ آمده است. در جدول ۵ مقادیر فرکانس تشدید به دست آمده از نرم‌افزار انسیس و روش تحلیلی برای مد ارتعاشی شناور تشدیدگر مستطیلی میکرومکانیکی با چهار تیر نگهدارنده‌ی T شکل به ازای ابعاد موجود در این جدول، آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، فرکانس تحلیلی مطابقت خوبی با فرکانس حاصل از نرم‌افزار انسیس دارد. همچنین نتایج جدول ۵ نشان می‌دهد که سختی معادل و جرم مؤثر تشدیدگر مستطیلی با چهار تیر نگهدارنده‌ی T شکل در مد ارتعاشی شناور به درستی استخراج شده است. طبق مرجع [۱۶] سختی معادل در مد ارتعاشی شناور

محاسبه ضریب کیفیت اتلاف تکیه‌گاه

با جایگذاری روابط (۱۶)، (۲۷) و (۲۸) در رابطه‌ی (۳) و استفاده از روابط (۲۶)–(۲۴) رابطه‌ی ضریب کیفیت اتلاف تکیه‌گاه در مد شناور تشدیدگر مستطیلی میکرومکانیکی با چهار تیر نگهدارنده‌ی T شکل به صورت رابطه‌ی (۲۹) به دست می‌آید:

$$\frac{1}{Q_{p-T}} = \frac{8(\Pi_{M_b+M_t+F_z})}{\omega_{p-T} U_{p-4}}$$

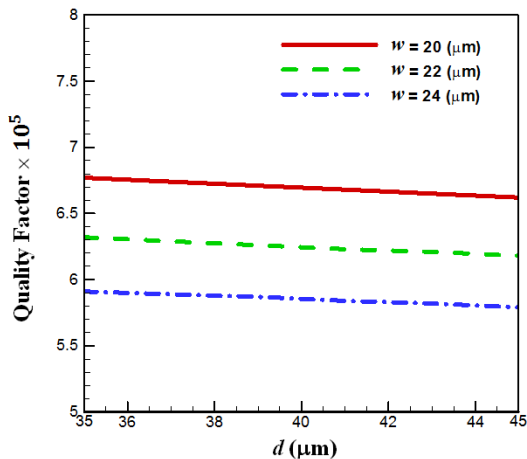
$$= \frac{2\sqrt{3(1-v^2)}\sqrt{db + \frac{26}{35}wL + 2w_1L_1\sqrt{wy_{33}}h^2}}{\sqrt{2}h_p^2L\sqrt{L}}$$

$$+ \frac{6(1-v^2)y_{22}wL_1^2h^3}{8L^3h_p^3} \quad (29)$$

$$+ \frac{6(1-v^2)y_{11}w(L+w_1)^2h^3}{2L^3h_p^3}$$

$$+ \frac{2.7(1-v^2)^{\frac{3}{4}}y_{23}L_1h^{\frac{5}{2}}w^{\frac{3}{4}}(db + \frac{26}{35}wL + 2w_1L_1)^{\frac{1}{4}}}{L^{\frac{9}{4}}h_p^{\frac{5}{2}}}$$

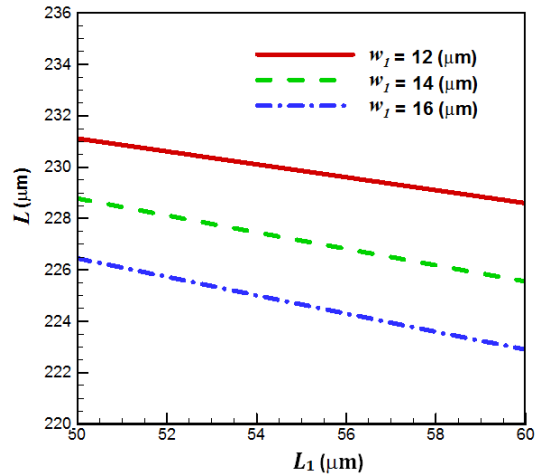
در شکل ۱۵، نمودار تغییرات ضریب کیفیت اتلاف تکیه‌گاه در مد شناور تشدیدگر مستطیلی با چهار تیر نگهدارنده‌ی T شکل به ازای تغییرات درازای تشدیدگر و در فرکانس تشدید ثابت رسم شده است. شکل ۱۵، نشان می‌دهد که با افزایش پهنای تیرهای نگهدارنده و درازای تشدیدگر در فرکانس تشدید ثابت، ضریب کیفیت اتلاف تکیه‌گاه کاهش می‌یابد. در این شکل، مقادیر متناظر درازای قسمت T شکل و طول تیرهای نگهدارنده برای ثابت ماندن فرکانس تشدید، از کانتور ۱۲ استخراج شده‌اند.



شکل ۱۵. نمودار تغییرات ضریب کیفیت اتلاف تکیه‌گاه در مد شناور تشدیدگر مستطیلی میکرومکانیکی به ازای تغییرات درازای تشدیدگر

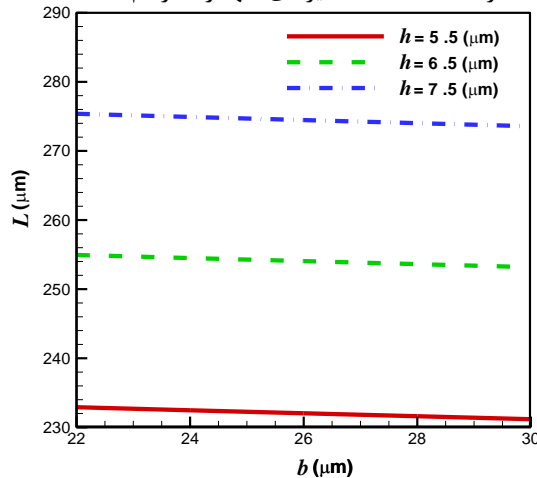
در شکل ۱۶، نمودار تغییرات ضریب کیفیت اتلاف تکیه‌گاه در مد شناور تشدیدگر مستطیلی با چهار تیر نگهدارنده‌ی T شکل به ازای تغییرات درازای قسمت T شکل در فرکانس تشدید ثابت رسم شده

کانتور ۱۲ نشان می‌دهد که با افزایش درازای تشدیدگر، برای دستیابی به فرکانس تشدید ثابت، باید طول تیرهای نگهدارنده کاهش و سایر ابعاد ساختار ثابت باشند. در شکل ۱۳، کانتور فرکانس مد شناور تشدیدگر مستطیلی میکرومکانیکی با چهار تیر نگهدارنده‌ی T شکل به ازای تغییرات درازای قسمت T شکل و مقادیر متناظر طول تیرهای نگهدارنده در فرکانس تشدید ثابت، به ازای سه مقدار مختلف پهنای پهنای قسمت T شکل رسم شده است.



شکل ۱۳. کانتور فرکانس مد شناور تشدیدگر مستطیلی میکرومکانیکی به ازای تغییرات درازای و پهنای قسمت T شکل

کانتور ۱۳ نشان می‌دهد که با افزایش درازای قسمت T شکل، برای دستیابی به فرکانس‌های تشدید ثابت، باید طول تیرهای نگهدارنده کاهش و سایر ابعاد ساختار ثابت باشند. در شکل ۱۴، کانتور فرکانس مد شناور تشدیدگر مستطیلی با چهار تیر نگهدارنده‌ی T شکل به ازای تغییرات پهنای تشدیدگر و مقادیر متناظر طول تیرهای نگهدارنده در فرکانس تشدید ثابت، به ازای سه مقدار مختلف ضخامت تیرهای نگهدارنده رسم شده است.



شکل ۱۴. کانتور فرکانس مد شناور تشدیدگر مستطیلی میکرومکانیکی به ازای تغییرات پهنای تشدیدگر و طول تیرهای نگهدارنده

مقایسه ضریب کیفیت اتلاف تکیه‌گاه

در این بخش براساس ابعاد موجود در جدول ۶ مقدار ضریب کیفیت اتلاف تکیه‌گاه در مد ارتعاشی شناور تشدیدگر مستطیلی با چهار تیر نگهدارنده‌ی معمولی و چهار تیر نگهدارنده‌ی T شکل در فرکانس تشدید ثابت مقایسه شده است.

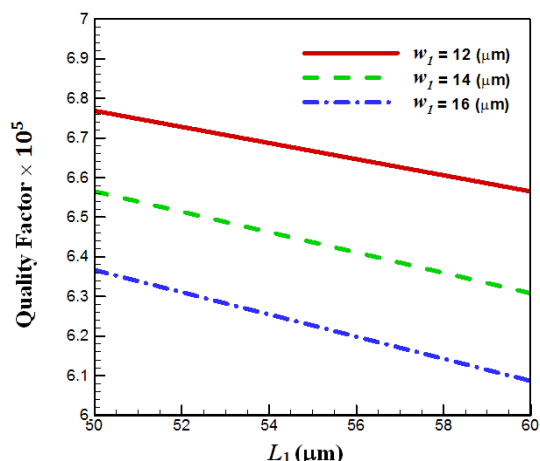
جدول ۶. مقادیر ضریب کیفیت در مد شناور تشدیدگر مستطیلی میکرومکانیکی با چهار تیر نگهدارنده معمولی و T شکل

مشخصات	نمونه ۱ با تیرهای معمولی	نمونه ۱ با تیرهای T شکل	نمونه ۲ با تیرهای معمولی	نمونه ۲ با تیرهای T شکل
h (μm)	۵/۵	۵/۵	۶/۵	۶/۵
w (μm)	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰
L (μm)	۲۴۷/۵۴	۲۳۱/۱۸	۲۴۵/۲	۲۲۸/۸۹
b (μm)	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰
d (μm)	۳۵	۳۵	۳۵	۳۵
$w1$ (μm)	-	۱۲	-	۱۲
$L1$ (μm)	-	۵۰	-	۵۰
hp (μm)	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۱۰۰۰
فرکانس تحلیلی (kHz)	۱۶۴/۵	۱۶۴/۵	۱۹۸	۱۹۸
ضریب کیفیت	۴۵۹۰۰۰	۶۷۷۰۰۰	۳۲۹۰۰۰	۴۸۰۰۰۰

همان‌طور که در جدول ۶ مشاهده می‌شود، ضریب کیفیت اتلاف تکیه‌گاه در تشدیدگر با چهار تیر نگهدارنده‌ی T شکل حدود ۱/۵ برابر از ضریب کیفیت اتلاف تکیه‌گاه در تشدیدگر با چهار تیر نگهدارنده‌ی معمولی بیشتر است. همچنین مشاهده می‌شود که طول تیرهای نگهدارنده در دو نمونه یکسان نیست؛ که علت آن دستیابی به فرکانس تشدید یکسان در دو نمونه می‌باشد. زیرا اگر تمام ابعاد یکسان باشند فرکانس تشدید دو مدل یکسان نیست و نمی‌توان مقایسه دقیقی انجام داد.

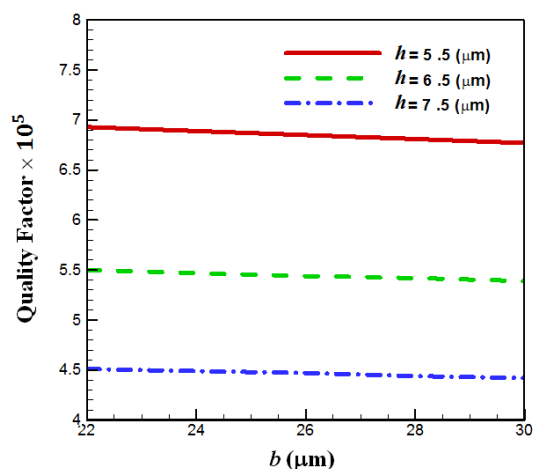
براساس ابعاد موجود در جدول ۷ مقدار ضریب کیفیت اتلاف تکیه‌گاه در مد ارتعاشی شناور تشدیدگر مستطیلی با دو و چهار تیر نگهدارنده‌ی معمولی و تشدیدگر مستطیلی با دو و چهار تیر نگهدارنده‌ی T شکل در فرکانس تشدید یکسان مقایسه شده است. رابطه‌ی ضریب کیفیت اتلاف تکیه‌گاه در مد ارتعاشی شناور تشدیدگر مستطیلی میکرومکانیکی با دو تیر نگهدارنده‌ی T شکل در مرجع [۱۳] محاسبه شده، که به صورت رابطه‌ی (۳۰) می‌باشد:

است. این شکل نشان می‌دهد که با افزایش پهنا و درازای قسمت T شکل در فرکانس تشدید ثابت، ضریب کیفیت اتلاف تکیه‌گاه کاهش می‌یابد. همچنین در این شکل، مقادیر متناظر درازای قسمت T شکل و طول تیرهای نگهدارنده برای ثابت ماندن فرکانس تشدید از کانتور ۱۳ استخراج شده‌اند.



شکل ۱۶. نمودار تغییرات ضریب کیفیت اتلاف تکیه‌گاه در مد شناور تشدیدگر مستطیلی میکرومکانیکی به ازای تغییرات طول قسمت T شکل

در شکل ۱۷، نمودار تغییرات ضریب کیفیت اتلاف تکیه‌گاه در مد شناور تشدیدگر مستطیلی با چهار تیر نگهدارنده‌ی T شکل به ازای تغییرات پهنای تشدیدگر، در فرکانس تشدید ثابت رسم شده است. این شکل نشان می‌دهد که با افزایش ضخامت تیرهای نگهدارنده و عرض تشدیدگر در فرکانس تشدید ثابت، ضریب کیفیت اتلاف تکیه‌گاه کاهش می‌یابد. همچنین در این شکل، مقادیر متناظر پهنای تشدیدگر و طول تیرهای نگهدارنده برای ثابت ماندن فرکانس تشدید از کانتور ۱۴ استخراج شده‌اند.



شکل ۱۷. نمودار تغییرات ضریب کیفیت اتلاف تکیه‌گاه در مد شناور تشدیدگر مستطیلی میکرومکانیکی به ازای تغییرات پهنای تشدیدگر

میکرومکانیکی با چهار تیر نگهدارنده معرفی شده و مدلسازی و استخراج روابط ضریب کیفیت اتلاف تکیه‌گاه برای ایجاد دید کافی در زمینه طراحی تشدیدگرهایی با ضریب کیفیت بالا انجام شده است. برای اعتبارسنجی نتایج، از مطالعات آزمایشگاهی مرجع [۱۹] استفاده شده است. نتایج این پژوهش با نتایج آزمایشگاهی مطابقت قابل قبولی داشته و درستی مدل‌سازی انجام شده را نشان می‌دهد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که مقدار نیرو و ممان در تکیه‌گاه تاثیر مستقیمی بر ضریب کیفیت اتلاف تکیه‌گاه داشته و برای کاهش هر چه بیشتر نیرو و ممان در تکیه‌گاه، استفاده از طرح جدید تشدیدگر مستطیلی میکرومکانیکی با چهار تیر نگهدارنده‌ی T شکل پیشنهاد شده است. برای بررسی درستی روابط به دست آمده برای فرکانس تشدید مد ارتعاشی شناور تشدیدگر مستطیلی با چهار تیر نگهدارنده‌ی معمولی و چهار تیر نگهدارنده‌ی T شکل، نتایج به دست آمده از روابط تحلیلی با نتایج شبیه‌سازی نرم‌افزار انسیس در سه نمونه مختلف مقایسه شده است که مطابقت خوبی را نشان می‌دهند. نتایج این مقاله نشان می‌دهند استفاده از تیرهای T شکل به جای تیرهای معمولی در فرکانس تشدید یکسان باعث افزایش ضریب کیفیت در حدود ۱/۵ برابر می‌شود. همچنین استفاده از چهار تیر T شکل به جای دو تیر T شکل، باعث افزایش ضریب کیفیت در حدود ۱/۰۸ برابر در فرکانس تشدید یکسان می‌شود. علاوه بر این، با افزایش درازا و پهنای قسمت T شکل و تشدیدگر، و نیز افزایش ضخامت و پهنای تیرهای نگهدارنده در فرکانس تشدید ثابت، ضریب کیفیت اتلاف تکیه‌گاه کاهش می‌یابد. همچنین نتایج نشان می‌دهند که با افزایش طول تیرهای نگهدارنده در فرکانس تشدید ثابت ضریب کیفیت اتلاف تکیه‌گاه افزایش می‌یابد.

$$\frac{1}{Q_{pr-T}} = \frac{4\Gamma}{\omega_{pr-T} U_{pr-T}} = \frac{\sqrt{3(1-\nu^2)} \sqrt{db + \frac{26}{35} wL + 2w_1 L_1 \sqrt{wy_{33}} h^2}}{\sqrt{2} h_p^2 L \sqrt{L}} + \frac{3(1-\nu^2) y_{22} w L_1^2 h^3}{8L^3 h_p^3} + \frac{3(1-\nu^2) y_{11} w (L + w_1)^2 h^3}{2L^3 h_p^3} + \frac{1.35(1-\nu^2)^{\frac{3}{4}} y_{23} L_1 h^{\frac{5}{2}} w^{\frac{3}{4}} \left(db + \frac{26}{35} wL + 2w_1 L_1 \right)^{\frac{1}{4}}}{L^{\frac{9}{4}} h_p^{\frac{5}{2}}} \quad (30)$$

جدول ۷. مقادیر ضریب کیفیت در مد شناور تشدیدگر مستطیلی میکرومکانیکی با دو و چهار تیر نگهدارنده معمولی و T شکل

مشخصات	نمونه ۱ با دو تیر معمولی	نمونه ۱ با دو تیر T شکل	نمونه ۲ با چهار تیر معمولی	نمونه ۲ با چهار تیر T شکل
h (μm)	۵/۵	۵/۵	۵/۵	۵/۵
w (μm)	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰
L (μm)	۲۳۹/۹۴	۲۲۵/۰۴	۲۴۷/۵۴	۲۳۱/۱۸
b (μm)	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰
d (μm)	۳۵	۳۵	۳۵	۳۵
w1 (μm)	-	۱۲	-	۱۲
L1 (μm)	-	۵۰	-	۵۰
hp (μm)	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۱۰۰۰
فرکانس تحلیلی (kHz)	۱۶۴/۵	۱۶۴/۵	۱۶۴/۵	۱۶۴/۵
ضریب کیفیت	۴۱۶۹۲۰	۶۲۵۰۰۰	۴۵۹۰۰۰	۶۷۷۰۰۰

مراجع

- [1] A. Bijari, S. H. Keshmiri, W. Wanburee, C. Sriphung, R. Phatthanakun, "Design and fabrication of a narrow-bandwidth micromechanical ring filter using a novel process in UV-LIGA technology," Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering, vol. 8, No. 4, pp. 280-289, 2012.
- [2] Z. Hao, R. Abdolvand, F. Ayazi, "A high-Q length-extensional bulk-mode mass sensor with annexed sensing platforms," The 19th proceeding IEEE International Micro Electro Mechanical Systems conference, 2006, Istanbul, Turkey, pp. 598-601.
- [3] X. Huang, S. Li, J. S. Schultz, Q. Wang, and Q. Lin, "A capacitive MEMS viscometric sensor for affinity detection of glucose," Journal of

جدول ۷ نشان می‌دهد که در فرکانس تشدید یکسان ضریب کیفیت اتلاف تکیه‌گاه در تشدیدگر با چهار تیر T شکل حدود ۱/۶۵ برابر بزرگتر از تشدیدگر با دو تیر معمولی است. همچنین تشدیدگر با چهار تیر نگهدارنده‌ی معمولی دارای ضریب کیفیت بالاتری نسبت به تشدیدگر با دو تیر نگهدارنده‌ی معمولی است و استفاده از دو تیر نگهدارنده‌ی بیشتر در ساختار تشدیدگر باعث افزایش ضریب کیفیت در فرکانس تشدید یکسان می‌شود.

نتیجه گیری

در این مقاله، برای افزایش ضریب کوپلاژ الکترومکانیکی بدون افزایش پهنای تیرهای نگهدارنده، استفاده از تشدیدگر مستطیلی میکرومکانیکی به جای تشدیدگرهای تیر در مد ارتعاشی شناور پیشنهاد شده است. همچنین، برای افزایش فاصله‌ی فرکانسی میان مد اصلی و مدهای ناخواسته طرح تشدیدگر مستطیلی

- and temperature on acoustic dissipation in a micromechanical silicon oscillator,” *Applied Physics Letters*,” vol. 86, 181903, 2005.
- [13] M. Bagheri, A. Bijari, M. Raghebi, “Modeling and calculating the anchor loss quality factor in the plunging-mode vibrations of a micromechanical rectangular-plate resonator with two T-shaped support beams,” *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 12, pp. 75-84, 2014 (In Persian).
- [14] H. J. De Los Santos, *RF MEMS Circuit Design for Wireless Communications*, Boston, Artech House, 2002.
- [15] Y.-W. Lin, S. Lee, S.-S. Li, Y. Xie, Z. Ren, and C. T.-C. Nguyen, “Series-resonant VHF micromechanical resonator reference oscillators,” *IEEE Journal of solid-state circuits*, vol. 39, no. 12, pp. 2477-2491, 2004.
- [16] H. Urey, C. Kan, W.O. Davis, “Vibration mode frequency formulae for micromechanical scanners,” *Journal of Micro-Mechanics and Microengineering*, vol. 15, 1713–1721, 2005.
- [17] E. Eichler, “Plate-Edge Admittances,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 36, No. 2, pp. 344-348, 1964.
- [18] J.X. SU, A.T. Moorhouse, “Closed form solution for the mobility of an edge excited, semi-infinite plate,” *Journal of Acoustical Society of America*, vol. 115, No. 5, pp. 2075-2082, 2004.
- [19] S. Pourkamali, A. Hashimura, R. Abdolvand, G.K. Ho, A. Erbil, F. Ayazi, “High-Q Single Crystal Silicon HARPSS Capacitive Beam Resonators With Self-Aligned Sub-100-nm Transduction Gaps,” *Journal of MicroelectroMechanical*, vol. 12, No. 4, pp. 487-496, 2003.
- [20] Y. Xie, S.-S. Li, Y.-W. Lin, Z. Ren, and C. T.-C. Nguyen, “Spurious mode suppression in UHF micromechanical extensional wine-glass ring resonators,” *International Micro Electro Mechanical Systems conference*, Miami, FL, 2005, pp. 219-222.
- Microelectromechanical Systems*, vol. 18, pp. 1245-1254, 2009.
- [4] A.-C. Wong, and C. T.-C. Nguyen, “Micromechanical Mixer-Filters (Mixlers),” *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 13, No. 1, pp. 100-112, 2004.
- [5] B. Chouvion, *Vibration Transmission and Support Loss in MEMS Sensors*, PhD Thesis, The University of Nottingham, 2010.
- [6] S. A. Chandorkar, R. Agarwal, M. Melamud, R. N. Candler, K. E. Goodson, and T. W. Kenny, “Limits of quality factor in bulk-mode micromechanical resonators,” *The IEEE 21th International conference on Micro Electro Mechanical Systems*, 2008, Tucson, USA, pp. 74-77.
- [7] B. Kim, M. A. Hopcroft, R. A. Candler, C. A. Jha, M. Agarwal, R. Melamud, S. A. Chandorkar, G. Yama, T.W.Kenny, “Temperature Dependence of Quality Factor in MEMS Resonators,” *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 17, No. 3, pp. 755-766, 2008.
- [8] J. A. Judge, D. M. Photiadis, J. F. Vignola, B. H. Houston, and J. Jarzynski, “Attachment loss of micromechanical and nanomechanical resonators in the limits of thick and thin support structures,” *Journal of Applied Physics*, vol. 101, No. 1, pp. 1-11, 2007.
- [9] X. Wang, D. Xiao, Z. Zhou, Z. Chen, X. Wu, S. Li, “Support loss for beam undergoing coupled vibration of bending and torsion in rocking mass resonator,” *Sensors and Actuators A*, vol. 171, pp. 199-206, 2011.
- [10] Z. Hao, A. Erbil, F. Ayazi, “An analytical model for support loss in micromachined beam resonators with in-plane flexural vibrations,” *Sensors and Actuators A*, vol. 109, pp. 156-164, 2003.
- [11] Z. Hao, F. Ayazi, “Support loss in the radial bulk-mode vibrations of center-supported micromechanical disk resonators,” *Sensors and Actuators A*, vol. 134, pp. 582-593, 2007.
- [12] H. Haucke, X. Liu, J. F. Vignola, B. h. Houston, M. H. Marcus, J. W. Baldwin, “Effects of annealing