



## آنالیز عددی و تجربی ارتعاشات میکروتیر وی شکل میکروسکوپ نیروی اتمی با در نظر گرفتن نانویالیاف پلی‌وینیل الکل به عنوان نمونه

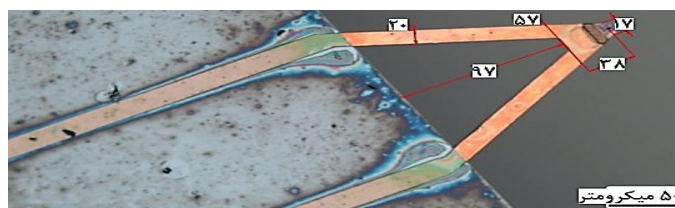
ایرج رضایی<sup>۱</sup>، علی صادقی<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد دماوند، دماوند، تهران، ایران  
<sup>۲</sup> استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد دماوند، دماوند، تهران، ایران

### برجسته‌ها

- با افزایش غلظت پلی‌وینیل الکل، مدول کشسانی افزایش می‌یابد.
- با افزایش مدول کشسانی، نمونه فرکانس تشدید و اندازه پاسخ فرکانسی در جهت جابه‌جایی عمودی افزایش می‌یابند.

### چکیده گرافیکی



### مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۰/۰۴/۲۱

بازنگری: ۱۴۰۰/۰۸/۲۷

پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۱۵

ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۱۰/۲۰

\*نویسنده مسئول:

[a\\_sadeghi@damavandiau.ac.ir](mailto:a_sadeghi@damavandiau.ac.ir)

کلید واژه‌ها:

میکروسکوپ نیروی اتمی

میکروتیر وی شکل

پلی‌وینیل الکل

نظریه تیر تیموشنکو

مدول کشسانی

### چکیده

در این تحقیق، رفتار ارتعاشی میکروتیر وی شکل میکروسکوپ نیروی اتمی با در نظر گرفتن نانوالیاف پلی‌وینیل الکل با داربست‌ها و غلظت‌های مختلف به عنوان نمونه نرم بررسی شده است. با توجه به اهمیت نانوفیبرهای پلی‌وینیل الکل و کاربرد آن‌ها در علوم پزشکی و صنعت، انجام تحقیقی مستقل در مورد رفتار مکانیکی و ارتعاشی نانوالیاف پلی‌وینیل الکل، لازم به نظر می‌رسد. پس از ساخت نانوالیاف پلی‌وینیل الکل با ساختارها و غلظت‌های مختلف، مدول کشسانی و نیروی چسبندگی آن‌ها برای هر دو مد نفوذی و بازگشتی میکروسکوپ به دست آمده است. برای بررسی خواص مکانیکی نانوالیاف پلی‌وینیل الکل با ساختارهای متفاوت، از میکروسکوپ نیروی اتمی جی‌پی‌کی مدل نانووویزارد ۲ به همراه نرم‌افزار تخصصی آن با ویرایش ۵/۰۹۶ استفاده شده است. طبق نتایج، با افزایش غلظت پلی‌وینیل الکل همانند مد نفوذی میکروسکوپ، مدول کشسانی افزایش یافته، اما چسبندگی کاهش می‌یابد. برای بررسی رفتار-ارتعاشی میکروتیر از مدل تیر تیموشنکو استفاده شده است. در تحقیق حاضر برای نخستین بار با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی، مدول کشسانی نانوالیاف پلی‌وینیل الکل با داربست‌ها و غلظت‌های مختلف، تعیین شده و سپس رفتار ارتعاشی میکروتیر وی شکل میکروسکوپ نیروی اتمی با توجه به پلی‌وینیل الکل به عنوان نمونه نرم با روش اجزای محدود و با استفاده از تئوری برخورد دی ام تی و همچنین روش تجربی بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهند که با افزایش مدول کشسانی، نمونه فرکانس تشدید و اندازه پاسخ فرکانسی در جهت جابه‌جایی عمودی افزایش می‌یابند. در نهایت، نتایج مدل‌سازی عددی با نتایج عملی ناشی از آزمایش، مقایسه شده که همگرایی خوبی را بین آن‌ها نشان می‌دهد.

## ۱- مقدمه

میکروسکوپ نیروی اتمی غوطه‌ور در محیط مایع را بررسی کردند. آن‌ها اثرات پارامترهای گوناگون را بر این رفتار غیرخطی ارزیابی کردند. به‌طور کلی، پلی‌وینیل الکل با توجه به داشتن خواص مفیدی مانند خواص مکانیکی خوب، استحکام قابل قبول و خاصیت غیرسمی بودن، در بسیاری از موارد از جمله ترمیم اسکلت استخوانی بدن کاربرد دارد [۹-۱۱]. استفاده از نانوالیاف پلی وینیل الکل با ساختار داربستی منظم در ساختارهای بیومولکولی و دارویی، اهمیت بالایی دارد و برای ساختن چنین نانوالیافی باید از دستگاه الکتروریسی استفاده کرد [۱۴-۱۲]. جهانمرد حسین‌آبادی و امینی طهرانی [۱۵] به بررسی خواص مکانیکی نانوالیاف پلیمری در دو حالت استفاده از آن‌ها به‌صورت تکی و دیگری به‌صورت جزئی از زمینه ماده مرکب پرداختند. کواریم و همکاران [۱۶] خواص مکانیکی سلول HN1 مربوط به تومور سر و گردن را بررسی کردند. آن‌ها از مدل برخورد دی‌ام‌تی برای تحلیل استفاده کردند.

در تحقیق حاضر، ارتعاشات نوسانی میکروتیر وی شکل میکروسکوپ نیروی اتمی با در نظر گرفتن نانوالیاف پلی‌وینیل الکل با ساختارهای متفاوت بررسی شده است. در مرحله نخست، نانوالیاف پلی‌وینیل الکل با روش الکتروریسی در دو شکل الیاف منظم و غیرمنظم تولید شده‌اند. در مرحله دوم، با در نظر گرفتن نمونه‌های پلی‌وینیل الکل در حالات مختلف، فرکانس تشدید و اندازه پاسخ فرکانسی جهت جابه‌جایی عمودی میکروتیر وی شکل اندازه‌گیری شده است.

## ۲- روش آزمایشگاهی

## ۲-۱- مواد

۰/۸ و ۱/۱ گرم پودر پلی‌وینیل الکل با وزن مولکولی ۸۵۰۰۰ تا ۱۲۴۰۰۰ گرم بر مول را که از شرکت سیگما در سنگاپور خریداری شده، با ۱۰ میلی‌لیتر آب مقطر حل کرده و در دمای تنظیم شده بین ۶۵ تا ۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲ ساعت در دستگاه الکتروریسی قرار می‌دهیم تا محلولی همگن و یکنواخت با غلظت پلی وینیل الکل ۷/۴۰۷ درصد و ۹/۰۹۱ درصد (به‌عنوان درصد وزنی) تولید شود.

میکروسکوپ نیروی اتمی در سال ۱۹۸۶ توسط بینینگ و همکاران [۱] ابداع شد. امروزه این میکروسکوپ کاربردهای بسیار وسیعی یافته است. از این میکروسکوپ علاوه بر عکس‌برداری از سطوح مختلف، برای تعیین خواص مکانیکی، نیروهای بین اتمی و خواص سطحی نمونه‌ها نیز استفاده می‌شود. این میکروسکوپ جهت بررسی دقیق سطح نمونه، حرکت نسبی بین میکروتیر و سطح نمونه را سنجش می‌کند. این حرکت به‌شدت به نیروی بین آن‌ها وابسته بوده و این نیرو نیز به‌شدت به فاصله بین میکروتیر و سطح نمونه وابسته است. بسیاری از دانشمندان از زمان ابداع این میکروسکوپ توانمند، رفتار ارتعاشی میکروتیر آن را با در نظر گرفتن نیروی بین آن و سطح نمونه بررسی کرده‌اند.

راه و همکاران [۲] رفتار ارتعاشی این میکروتیر را با در نظر گرفتن اثرات نگهدارنده بررسی کرده‌اند. آن‌ها از مدل تیر اوپلر-برنولی بهره بردند که آثار نیروی برشی و اینرسی چرخشی را در نظر نمی‌گیرد. ساهین و همکاران [۳] میکروتیری برای میکروسکوپ نیروی اتمی ابداع کردند تا با استفاده از آن بتوانند نیروی بین سطح نمونه و میکروتیر را اندازه‌گیری کنند. آن‌ها توانستند این نیروی متغیر با زمان را به‌درستی اندازه‌گیری کنند. اسلامی و جلیلی [۴] نیروی غیرخطی بین سطح نمونه و میکروتیر را برای میکروتیر مستطیلی، مدل‌سازی کردند. آن‌ها از مدل تیر اوپلر-برنولی بهره بردند. پیام [۵] در مطالعه خود، حساسیت مدهای نوسانی یک میکروتیر مستطیلی غوطه‌ور در محیط مایع را نسبت به عوامل مختلفی مانند ویسکوزیته محیط غوطه‌وری بررسی کرده است. کواریم و همکاران [۶] ارتعاشات میکروتیرهای مختلف میکروسکوپ نیروی اتمی را با در نظر گرفتن لایه پیزوالکتریک روی آن‌ها بررسی کردند. همچنین آن‌ها در مطالعه دیگری [۷]، ارتعاشات میکروتیر میکروسکوپ نیروی اتمی را با در نظر گرفتن لایه پیزوالکتریک با تنش کششی وارده روی آن بررسی کردند. آن‌ها از مدل کلوین-ویت جهت مدل‌سازی رفتار کشسان گونه مجموعه بهره بردند. صادقی و قلی‌زاده پاشا [۸] رفتار دینامیکی غیرخطی میکروتیر ذوزنقه‌ای شکل

شکل ۱: شماتیک دستگاه الکترورسی افقی

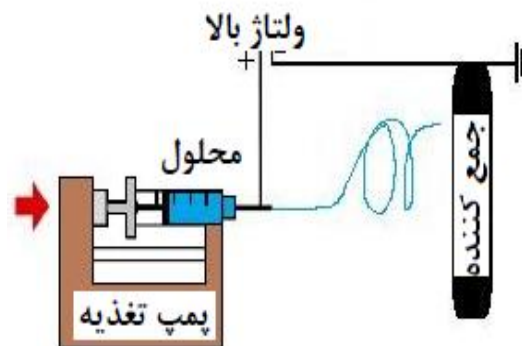


**شکل ۲:** دستگاه الکترورسی ساخت شرکت نانو ساختار آسیا بر اساس شکل ۳، دو حرکت متفاوت (نزدیک شدن و دور شدن میکروتیر) قابل تشخیص است. با نزدیک شدن میکروتیر به سطح، نیروی بین میکروتیر و سطح نمونه، بسیار کم می‌شود. هرچه میکروتیر به سطح نزدیک‌تر می‌شود، در فاصله ویژه نیروی جاذبه بر ثابت فسر میکروتیر غلبه کرده و نوک میکروتیر تماس می‌یابد. با ادامه این روند، نیروی دافعه افزایش می‌یابد. با فاصله گرفتن میکروتیر از سطح، بر اساس نیروی چسبندگی، نوک میکروتیر در تماس باقی می‌ماند. این چسبندگی در سطوح سخت، کمتر است. به‌طور کلی، با استفاده از نمودار تغییرات نیروی بین میکروتیر و سطح نمونه، مدول کشسانی با فاصله از سطح نمونه به دست می‌آید. می‌توان از نقطه تماس به‌عنوان پارامتر مناسب استفاده کرد؛ البته تعریف نقطه تماس واقعی، بسیار دشوار است. معمولاً نسبت پواسون برای نمونه‌های بیولوژیکی نرم بر روی ۰/۵ تنظیم می‌شود. مدل هرتز برای نفوذهای کوچک (۲۰۰-۵۰۰ نانومتر)، مناسب است؛ بنابراین این مدل برای نمونه‌های نازک، قابل قبول است. برای تحلیل از میکروسکوپ نیروی اتمی جی‌پی‌کی مدل نانوويزارد ۲ (شکل ۴) به‌همراه میکروتیر وی‌شکل از جنس سیلیکون نیتريد مدل هیدرا از شرکت اپ‌نانو (شکل ۵) استفاده شده است. برای مشخصات ابعادی و مکانیکی میکروتیر می‌توان موارد زیر را در نظر گرفت:

مدول کشسانی میکروتیر ۳۱۱ گیگاپاسکال، عدد پواسون ۰/۲۴، سختی میکروتیر ۰/۳۲ نیوتن بر متر، شعاع نوک ۱۰

## ۲-۲- ساخت داربست‌های نانوالیاف پلی وینیل الکل با شکل‌های منظم و غیرمنظم با روش الکترورسی

دستگاه الکترورسی از یک منبع با اختلاف پتانسیل الکتریکی پر قدرت، یک سوزن متصل به مخزن اصلی پلیمر (در اینجا پودر پلی‌وینیل الکل) و در نهایت، یک منبع ثانویه چرخان (به‌عنوان جمع‌کننده زمینی) تشکیل شده است (شکل ۱). محلول پلی‌وینیل الکل به‌وسیله نیروی کشش سطحی به‌صورت قطره در محل سوزن نگه داشته می‌شود. با اعمال ولتاژ الکتریکی بین سوزن و جمع‌کننده و سپس افزایش ولتاژ، قطرات سطح مایع محلول پلی‌وینیل الکل در نوک سوزن تغییر شکل داده و به‌صورت مخروط درمی‌آیند. وقتی شدت میدان‌های الکتریکی از مقدار بحرانی عبور کند، دافعه الکتریکی بین بارهای سطح قطرات افزایش یافته و این نیرو بر کشش سطحی قطرات محلول پلی‌وینیل الکل غلبه می‌کند. در نهایت، جریانی از محلول پلی‌وینیل الکل خارج شده و روی صفحه جمع‌کننده قرار می‌گیرد. برای این مطالعه، دستگاه الکترورسی از شرکت نانو ساختار آسیا خریداری شده است (شکل ۲). در این دستگاه، فاصله از نوک سوزن تا جمع‌کننده برابر ۱۲ سانتی‌متر، جریان تغذیه محلول پلی‌وینیل الکل معادل ۰/۱ میلی‌لیتر، ولتاژ مورد استفاده حدود ۲۴ کیلوولت و در نهایت، سرعت چرخش ۳۰۰ دور بر دقیقه برای الیاف غیرمنظم و ۲۵۰۰ دور بر دقیقه برای الیاف منظم تنظیم شده است.



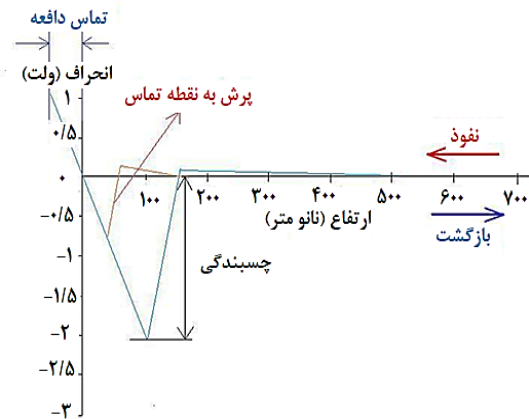
### ۳- تعیین مدول الاستیک و نیروی چسبندگی نانوالیاف پلی‌وینیل الکل

تا اینجا با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی، مدول کشسانی و نیروی چسبندگی نمونه‌های نانوالیاف پلی‌وینیل الکل با ساختارهای منظم و غیرمنظم به دست آمده است. جدول ۱ مقادیر مدول‌های کشسانی و نیروهای چسبندگی را برای نمونه‌های مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود، با افزایش غلظت و درصد وزنی پلی‌وینیل الکل، مدول کشسانی افزایش یافته، اما نیروی چسبندگی کاهش می‌یابد که علت آن، افزایش نیروهای بین‌مولکولی و تقویت ساختار داخلی ماده بر مبنای افزایش غلظت پلی‌وینیل الکل است. بر اساس نتایج جدول ۱، مقادیر مدول کشسانی برای نانوالیاف با ساختار غیرمنظم، بزرگ‌تر از ساختار منظم و ماده، سخت‌تر خواهد بود. علت این امر، همپوشانی بیشتر ریزترک‌ها و سایر عیوب داخلی با استفاده از شبکه نیروهای بین‌مولکولی قوی در ساختار غیرمنظم است.

### ۴- تحلیل دینامیکی میکروتیر میکروسکوپ نیروی اتمی با در نظر گرفتن نمونه نانوالیاف پلی‌وینیل الکل

در این بخش، سطح نانوالیاف پلی‌وینیل الکل در محیط هوا و با میکروتیر وی شکل تحلیل شده است (شکل‌های ۶ و ۷). برای توصیف نیروی بین سطح نمونه و میکروتیر از مدل دی‌ام‌تی استفاده شده که توانایی توصیف نیروی چسبندگی را دارد. مدل تیر تیموشنکو اثرات تغییر شکل برشی و اینرسی چرخشی را در نظر می‌گیرد. قسمت مستطیلی، سطح مقطع ثابتی دارد. در ابتدا معادلات ارتعاشی تیر با استفاده از مدل تیر تیموشنکو برای قسمت مستطیلی با سطح مقطع ثابت به صورت زیر توصیف شده است [۱۷].

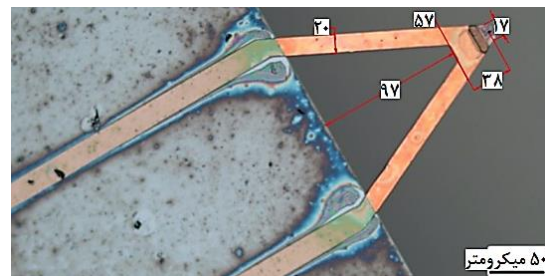
نانومتر و ارتفاع نوک ۵ میکرومتر. نرم‌افزار تخصصی میکروسکوپ ویرایش ۵/۰/۹۶ است. این میکروسکوپ قادر است به صورت خودکار، ۶۴ نقطه را با سرعت ۲ میکرومتر بر ثانیه اسکن کند تا خصوصیات مکانیکی مانند مدول کشسانی و نیروی چسبندگی، تعیین شوند.



شکل ۳: نمودار مدهای نفوذ و بازگشتی میکروتیر



شکل ۴: میکروسکوپ نیروی اتمی جی پی کی مدل نانو ویزارد ۲



شکل ۵: میکروتیر وی شکل، مدل هیدرا از شرکت اپ نانو

$$f_n = \begin{cases} -\frac{H_A R}{6d_n^2}, & d_n > a_0 \\ -\frac{H_A R}{6a_0^2} + f_c, & d_n \leq a_0 \end{cases} \quad (6)$$

که در آن  $d_n = D + w$  و نیروی عمودی بین سطح نمونه و نوک میکروتیر بر اساس مدل برخورد هرتز به صورت  $f_c = \frac{4}{3} E^* \sqrt{R} (a_0 - d_n)^{3/2}$  بیان شده و در نهایت، مدول کشسانی معادل به صورت  $\frac{1}{E^*} = \frac{1-\nu_s^2}{E_s} + \frac{1-\nu_t^2}{E_t}$  بیان می‌شود. نیروی چسبندگی نانوالیاف پلی‌وینیل الکل به عنوان نمونه مورد نظر در این مقاله با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی و بر اساس اطلاعات مستخرج از نرم افزار آن محاسبه می‌شود. بر اساس مدل برخورد هرتز، نیروی مماسی بین سطح نمونه و نوک میکروتیر به صورت زیر نوشته می‌شود.

$$f_t = \begin{cases} 0, & d_n > a_c \\ -8G^* \left( \frac{3Rf_c}{4E^*} \right)^{1/3} w, & d_n \leq a \end{cases} \quad (7)$$

که در آن  $\frac{1}{G^*} = \frac{2-\nu_s}{G_s} + \frac{2-\nu_t}{G_t}$ . با استفاده از بسط مرتبه سوم تیلور و با در نظر گرفتن زاویه بین میکروتیر و سطح نمونه و بر اساس محاسبات و ساده سازی انجام شده، نیروهای عمودی هرتزی و مماسی بین نوک میکروتیر و سطح نمونه، عبارتند از [۱۹]:

$$f_n = \left( k_n - k_{n1} \frac{w(0,t) \cos(\alpha)}{\delta_0} - k_{n2} \frac{(w(0,t) \cos(\alpha))^2}{\delta_0^2} \right) \times (w(0,t) \cos(\alpha) - H\phi(0,t) \sin(\alpha)), \quad (8)$$

$$k_n = \frac{3}{2} K_0 \delta^{1/2}, k_{n1} = \frac{1}{4} k_n, k_{n2} = \frac{1}{24} k_n,$$

$$K_0 = \frac{4}{3} E^* \sqrt{R}, \frac{1}{E^*} = \frac{1-\nu_s^2}{E_s} + \frac{1-\nu_t^2}{E_t},$$

$$\delta_0 = Z_0 - D$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ kGA_0 \left( \frac{\partial v(x,t)}{\partial x} - \psi(x,t) \right) \right] - \rho A_0 \frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial t^2} - c \frac{\partial v(x,t)}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ EI_{y0} \left( \frac{\partial \psi(x,t)}{\partial x} \right) \right] + kGA_0 \left( \frac{\partial v(x,t)}{\partial x} - \psi(x,t) \right) - \rho I_{y0} \frac{\partial^2 \psi(x,t)}{\partial t^2} = 0, -L_0 \leq x \leq 0 \quad (2)$$

معادلات ارتعاشی تیر بر اساس مدل تیموشنکو برای قسمت دوزنقه‌ای با سطح باریک‌شونده عبارت است از [۱۷]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ kGA_1 \left( \frac{\partial w(x,t)}{\partial x} - \phi(x,t) \right) \right] - \rho A_1 \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial t^2} - c \frac{\partial w(x,t)}{\partial t} = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ EI_{y1} \left( \frac{\partial \phi(x,t)}{\partial x} \right) \right] + kGA_{y1} \left( \frac{\partial w(x,t)}{\partial x} - \phi(x,t) \right) - \rho I_{y1} \frac{\partial^2 \phi(x,t)}{\partial t^2} = 0, 0 \leq x \leq L_1 \quad (4)$$

$$A_1 = A_0' (1 - C_b \xi_1) (1 - C_h \xi_1), \quad (5 \text{ الف})$$

$$I_{y1} = I_{y0}' (1 - C_b \xi_1) (1 - C_h \xi_1)^3, \quad (5 \text{ ب})$$

$$C_b = 1 - \frac{b_2}{b_1}, \quad C_h = 1 - \frac{h_2}{h_1}, \quad (5 \text{ ج})$$

$$b = b_1 (1 - C_b \xi_1) (1 - C_h \xi_1), \quad (5 \text{ د})$$

روابط (۵ الف) تا (۵ د) با توجه به سطح مقطع کاهش یافته دوزنقه در نظر گرفته شده‌اند. سطح نمونه مورد نظر از نوع نانوالیاف و از جنس پلی‌وینیل الکل است که به عنوان سطحی نرم در نظر گرفته می‌شود. با در نظر گرفتن فاصله D به عنوان فاصله تعادلی بین میکروتیر و سطح نمونه و بر اساس مدل برخورد دی‌ام‌تی که نیروی چسبندگی را در نظر می‌گیرد، نیروی عمودی بین سطح نمونه و نوک میکروتیر با فرض نیروی چسبندگی عبارت است از [۱۸]:

میکروتیر ذوزنقه‌ای با سطح نمونه در تماس است و تحت تأثیر نیروهای عمودی و مماسی قرار می‌گیرد، شرایط مرزی جهت میکروتیر وی شکل به صورت زیر بیان می‌شود:

$$v(-L_0, t) = 0 \quad (10)$$

$$\psi(-L_0, t) = 0, \quad (11)$$

$$v(0, t) = w(0, t), \quad (12)$$

$$\psi(0, t) = \phi(0, t), \quad (13)$$

$$I_{y0} \frac{\partial \psi(0, t)}{\partial x} - I_{y0}' \frac{\partial \phi(0, t)}{\partial x} = 0, \quad (14)$$

$$kGA_0 \left( \frac{\partial v(0, t)}{\partial x} - \psi(0, t) \right) - \quad (15)$$

$$kGA_0' \left( \frac{\partial w(0, t)}{\partial x} - \phi(0, t) \right) = 0,$$

$$EI_{y0}' (1 - C_b)(1 - C_h)^3 \frac{\partial \phi(L_1, t)}{\partial x} =$$

$$(-f_t \cos(\alpha) + f_n \sin(\alpha))H - m_{ip} d^2 \frac{\partial^2 \phi(L_1, t)}{\partial t^2}$$

$$= \left( k_t - k_{t1} \frac{w(L_1, t) \cos(\alpha)}{\delta_0} - k_{t2} \left( \frac{w(L_1, t) \cos(\alpha)}{\delta_0} \right)^2 \right)$$

$$\times \left( \frac{H}{2} w(L_1, t) \sin(2\alpha) + H^2 \phi(L_1, t) \cos^2(\alpha) \right) \quad (16)$$

$$+ \left( k_n - k_{n1} \frac{w(L_1, t)}{\delta_0} \cos(\alpha) - k_{n2} \frac{w(L_1, t)^2}{\delta_0^2} \cos^2(\alpha) \right)$$

$$\times \left( \frac{H}{2} w(L_1, t) \sin(2\alpha) - H^2 \phi(L_1, t) \sin^2(\alpha) \right)$$

$$- m_{ip} d^2 \frac{\partial^2 \phi(L_1, t)}{\partial t^2}$$

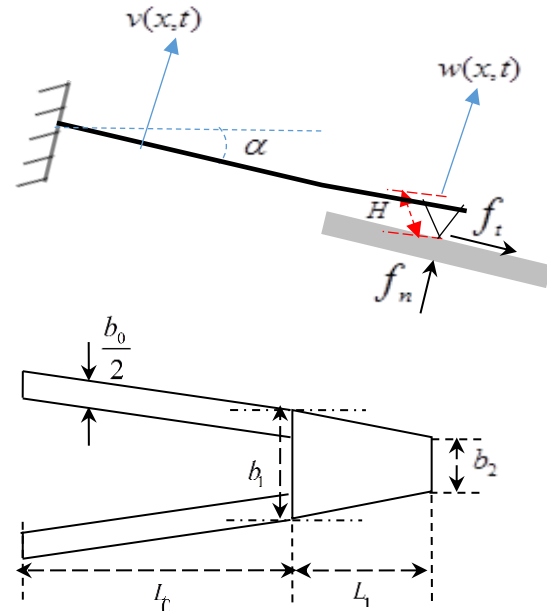
$$kGA_0' (1 - C_b)(1 - C_h) \left( \phi(L_1, t) - \frac{\partial w(L_1, t)}{\partial x} \right) =$$

$$(f_t \sin(\alpha) + f_n \cos(\alpha)) + m_{ip} \frac{\partial^2 w(L_1, t)}{\partial t^2} \quad (17)$$

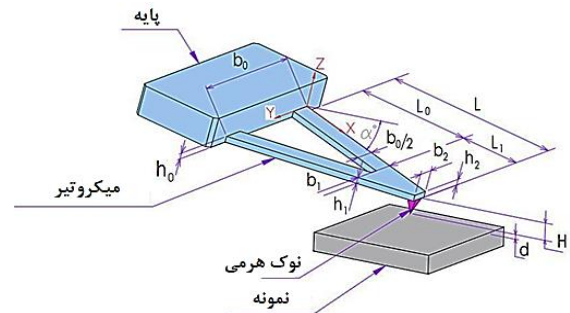
$$f_t = \left( k_t - k_{t1} \left( \frac{w(0, t) \cos(\alpha)}{\delta_0} \right) - k_{t2} \left( \frac{w(0, t) \cos(\alpha)}{\delta_0} \right)^2 \right) \times (w(0, t) \sin(\alpha) + H \phi(0, t) \cos(\alpha)), k_t = 8G_0 \delta_0^{1/2}, \quad (9)$$

$$k_{t1} = \frac{1}{2} k_t, k_{t2} = \frac{1}{8} k_t, G_0 = G^* \sqrt{R_t},$$

$$\frac{1}{G^*} = \frac{2 - \nu_s}{G_s} + \frac{2 - \nu_t}{G_t}$$



شکل ۶: شماتیک دوبعدی میکروتیر وی شکل



شکل ۷: شماتیک میکروتیر وی شکل

با در نظر گرفتن شرایط واقعی میکروتیر که در آن اندازه ارتعاشات بسیار کوچک است، می‌توان در معادلات (۸) و (۹) از پارامترهای غیرخطی چشم‌پوشی کرد. با فرض اینکه میکروتیر مستطیلی از یک طرف به نگهدارنده ثابت و از طرف دیگر به میکروتیر ذوزنقه‌ای متصل بوده و نیز انتهای

که در آن پارامتر  $G_t^T$  به عنوان ماتریس کرونوکر معرفی می شود و بیانگر موقعیت واقعی گره جابه جایی C در بردار جابه جایی کلی مجموعه است.  $F_{nor/adh}$  همان نیروی چسبندگی ناشی از تئوری دی ام تی می باشد. ماتریس  $f_{ts}$  به عنوان ماتریس نیروی بین نوک تیپ و سطح نمونه شناخته می شود، بدون فرض نیروی چسبندگی:

$$\begin{aligned} f_y^C &= f_t \sin(\alpha) + f_n \cos(\alpha), \\ M_z^C &= H(-f_t \cos(\alpha) + f_n \sin(\alpha)), \end{aligned} \quad (23)$$

$K_{T-S}$  ماتریس سختی کل مجموعه و مرتبط با نیروی بین سطح نمونه و نوک میکروتیر است. این ماتریس شامل نیروها و گشتاورهای انتهای میکروتیر است. با در نظر گرفتن نیروی چسبندگی بین نوک تیپ و سطح نمونه و استفاده از مدل دی ام تی خواهیم داشت:

$$\begin{bmatrix} f_y \\ M_z \end{bmatrix} = -[k_{ts}] \begin{bmatrix} w \\ \phi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{H_A R}{6a_0^2} \cos(\alpha) \\ -\frac{H_A R}{6a_0^2} H \sin(\alpha) \end{bmatrix} \quad (24)$$

در ادامه:

$$[k_{ts}] = \begin{bmatrix} k_n \cos^2(\alpha) + k_t \sin^2(\alpha) & H \cos(\alpha) \sin(\alpha) (k_t - k_n) \\ H \cos(\alpha) \sin(\alpha) (k_t - k_n) & H^2 (k_n \sin^2(\alpha) + k_t \cos^2(\alpha)) \end{bmatrix} \quad (25)$$

که  $k_t$  و  $k_n$  در معادله بالا به عنوان سختی نسبی عمودی و مماسی بین نوک تیپ و سطح نمونه شناخته می شوند و مقادیر آنها از معادلات (8) و (9) به دست می آید. با در نظر گرفتن  $q_z(t) = h_q e^{i\omega t}$  به عنوان جابه جایی نوسانی نگهدارنده و همین طور در نظر گرفتن  $w(t) = W e^{i\omega t}$  به عنوان جابه جایی نوسانی میکروتیر و فرض خطی بودن نیروی بین نوک تیپ و سطح نمونه، معادله (19) به صورت زیر بیان می شود:

$$\begin{aligned} ((K + K_{T-S}) + i\omega C - M\omega^2)W &= \\ M\omega^2 I_z h_q + F_{nor/adh} - K_{T-S} I_z h_q & \end{aligned} \quad (26)$$

$$\begin{aligned} & \left( k_t - k_{t1} \frac{w(L_1, t) \cos(\alpha)}{\delta_0} - k_{t2} \left( \frac{w(L_1, t) \cos(\alpha)}{\delta_0} \right)^2 \right) \\ & \times \left( w(L_1, t) \sin^2(\alpha) + \frac{H}{2} \phi(L_1, t) \sin(2\alpha) \right) + \\ & \left( k_n - k_{n1} \frac{w(L_1, t)}{\delta_0} \cos(\alpha) - k_{n2} \frac{w(L_1, t)^2}{\delta_0^2} \cos^2(\alpha) \right) \\ & \times \left( w(L_1, t) \cos^2(\alpha) - \frac{H}{2} \phi(L_1, t) \sin(2\alpha) \right) + m_{np} \frac{\partial^2 w(L_1, t)}{\partial t^2}, \end{aligned}$$

## ۵- مدل سازی سیستم ارتعاشی با روش اجزای محدود

اگر متغیر  $q_z(t)$  به عنوان جابه جایی عمودی نگهدارنده در نظر گرفته شود، به طور کلی جابه جایی عمودی میکروتیر عبارت است از:

$$d(t) = w(t) + I_z q_z(t) \quad (18)$$

$$I_z = [1, 0, 1, 0, \dots]^T \quad (19)$$

با در نظر گرفتن  $I_z$  معادل واحد،  $d(t)$  توصیف می شود. این پارامتر در سایر موارد، معادل صفر در نظر گرفته می شود. با استفاده از روش اجزای محدود و با در نظر گرفتن نیروی بین سطح نمونه و نوک میکروتیر، جابه جایی میکروتیر به صورت زیر بیان می شود:

$$M \ddot{w} + C \dot{w} + K w = f_{ts} - M I_z \ddot{q}_z(t) \quad (20)$$

که در آن  $M, C, K$  به ترتیب ماتریس های جرم، میرایی و سختی بر مبنای مدل تیر تیموشنکو هستند (پیوست 1). نیروی بین سطح نمونه و میکروتیر با استفاده از مدل برخورد دی ام تی به صورت زیر نوشته می شود:

$$F_{ts} = G_t^T (f_{ts}^C + f_{nor/adh}^C) f_{ts}^C = -K_{T-S} w + F_{nor/adh} \quad (21)$$

$$f_{ts} = \{f_y^C, M_z^C\}^T \quad (22)$$

پارامتر کیفیت است. برای دو پارامتر نخست پارامتر کیفیت گرفته می‌شود. همچنین زاویه بین میکروتیر و سطح نمونه برابر ۱۵ درجه در نظر گرفته می‌شود. با توجه به مقادیر جدول ۱ با افزایش غلظت پلی‌وینیل الکل، مدول کشسانی بزرگ‌تر می‌شود. علت این امر، افزایش مقدار پلی‌وینیل الکل و در نتیجه، افزایش پیوندهای شیمیایی در شبکه کریستالی ماده است که منجر به افزایش استحکام و بزرگ‌تر شدن مدول الاستیک می‌شود. همچنین طبق جدول ۱، مدول کشسانی شبکه کریستالی با نانوالیاف و داربست غیرمنظم، به مراتب بزرگ‌تر از داربست منظم است. علت این امر، افزایش حجم پیوندهای شیمیایی در شبکه کریستالی با داربست‌های غیرمنظم و در نتیجه افزایش استحکام ماده است. از آنجاکه رفتار نیروی چسبندگی نمونه در مقایسه با استحکام و مدول کشسانی، کاملاً معکوس است، طبق جدول ۱، نیروی چسبندگی نمونه‌ها با داربست غیرمنظم، کم‌تر از داربست منظم است و به همین ترتیب، با افزایش غلظت پلی‌وینیل الکل، نیروی چسبندگی کاهش می‌یابد. در حقیقت با افزایش سختی ماده، چسبندگی آن کاهش می‌یابد. جدول ۱، تأثیر مدهای حرکتی میکروسکوپ نیروی اتمی بر مدول کشسانی و نیروی چسبندگی نمونه‌ها را نشان می‌دهد. بر این اساس، مدول کشسانی برای مد نفوذی، بزرگ‌تر از مد بازگشتی میکروسکوپ است که علت آن را می‌توان در شکست پیوندهای شیمیایی در شبکه کریستالی نمونه، قبل و بعد از نفوذ میکروتیر میکروسکوپ جست‌وجو کرد. هنگام بازگشت میکروتیر از سطح نمونه به علت شکست پیوندهای شیمیایی استحکام کاهش می‌یابد و در نتیجه، مدول کشسانی کاهش یافته، اما نیروی چسبندگی افزایش می‌یابد. به‌طور کلی با افزایش سختی و استحکام نمونه، اندازه فرکانس تشدید و پاسخ فرکانسی عمودی افزایش می‌یابد. جدول ۲ بیانگر فرکانس تشدید میکروتیر میکروسکوپ نیروی اتمی به ازای نمونه‌های مختلف نانوالیاف پلی وینیل الکل با غلظت‌ها و داربست‌های مختلف است. طبق جدول ۲ و همچنین شکل‌های ۸ و ۹، فرکانس تشدید میکروتیر به دلیل داشتن مدول کشسانی بزرگ‌تر، برای نمونه‌هایی با غلظت‌های بالای پلی‌وینیل الکل، بزرگ‌تر خواهد بود. استفاده از الیاف با داربست‌های غیرمنظم مانند کاربرد مد نفوذی میکروسکوپ به دلیل افزایش استحکام و

در ادامه، بردار تابع پاسخ فرکانسی میکروتیر با در نظر گرفتن نیروی بین میکروتیر و سطح نمونه (مد تماسی) به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$FRF(\omega)|_{Contact Mode} = \frac{W}{h_q} = \frac{1}{((K + K_{T-S}) + i\omega C - M\omega^2)^{-1} \times ((M\omega^2 - K_{T-S})I_z + F_{nor/adh})} \quad (27)$$

با صرف‌نظر از نیروی بین سطح نمونه و نوک میکروتیر، بردار تابع پاسخ فرکانسی میکروتیر عبارت است از:

$$FRF(\omega)|_{Non-Contact Mode} = \frac{W}{h_q} = \frac{1}{(K + i\omega C - M\omega^2)^{-1} \times (M\omega^2)I_z} \quad (28)$$

در معادلات بالا ماتریس‌های  $M$ ،  $K$  و  $C$  به ترتیب به‌عنوان ماتریس‌های جرم، سختی و میرایی شناخته می‌شوند که در پیوست ۱ برای تیر تیموشنکو بیان شده‌اند. در روش اجزای محدود و با کدنویسی در محیط نرم‌افزار Mathematica ویرایش هشتم، برای رسیدن به بالاترین میزان همگرایی و کم‌ترین مقدار خطای قابل توجه (تا چهار رقم اعشار جهت فرکانس تشدید)، تعداد ۳۵ المان در قسمت مستطیلی میکروتیر و ۳۰ المان در قسمت دوزنقه‌ای آن در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است مقادیر مذکور با روش سعی و خطا و به‌منظور دستیابی به حداقل خطا (برای فرکانس تشدید) تعیین شده‌اند.

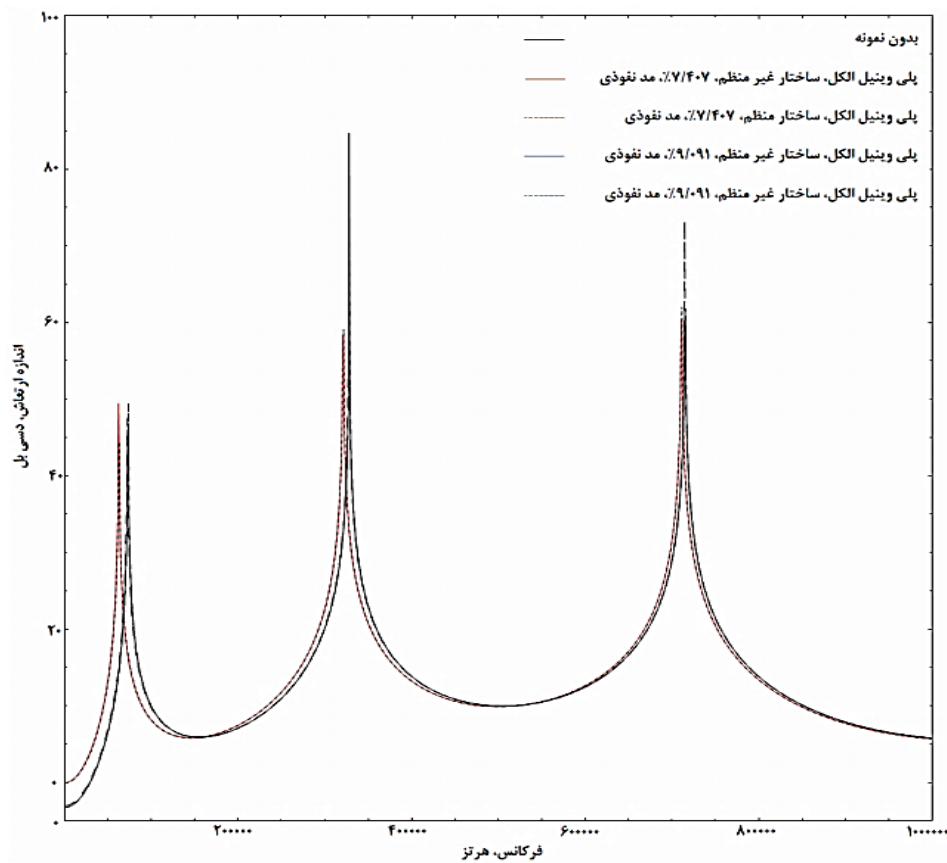
## ۶- نتایج

در این تحقیق، تأثیر نمونه‌های مختلف نانوالیاف پلی‌وینیل الکل با ساختارها و غلظت‌های مختلف بر فرکانس تشدید و اندازه پاسخ فرکانسی جهت جابه‌جایی عمودی بررسی شده است. همچنین از میکروتیر وی‌شکل نوع هیدرا از شرکت اپ‌نانو با مشخصات ابعادی و مکانیکی زیر استفاده شده است: طول‌ها  $L_0 = 97 \mu\text{m}$ ،  $L_1 = 38 \mu\text{m}$ ، ارتفاع میکروتیر  $h = 0.66 \mu\text{m}$ ، چگالی  $\rho = 3270 \text{ kg/m}^3$ ، پهنا  $b_0 = 40 \mu\text{m}$ ،  $b_1 = 57 \mu\text{m}$ ،  $b_2 = 14 \mu\text{m}$  میرایی سازه‌ای  $C$  به‌صورت تناسبی و یکپارچه به شکل  $\zeta = \frac{1}{2}Q = C \sqrt{L^2 / (9EI\rho A)}$  بیان می‌شود که در آن  $Q$

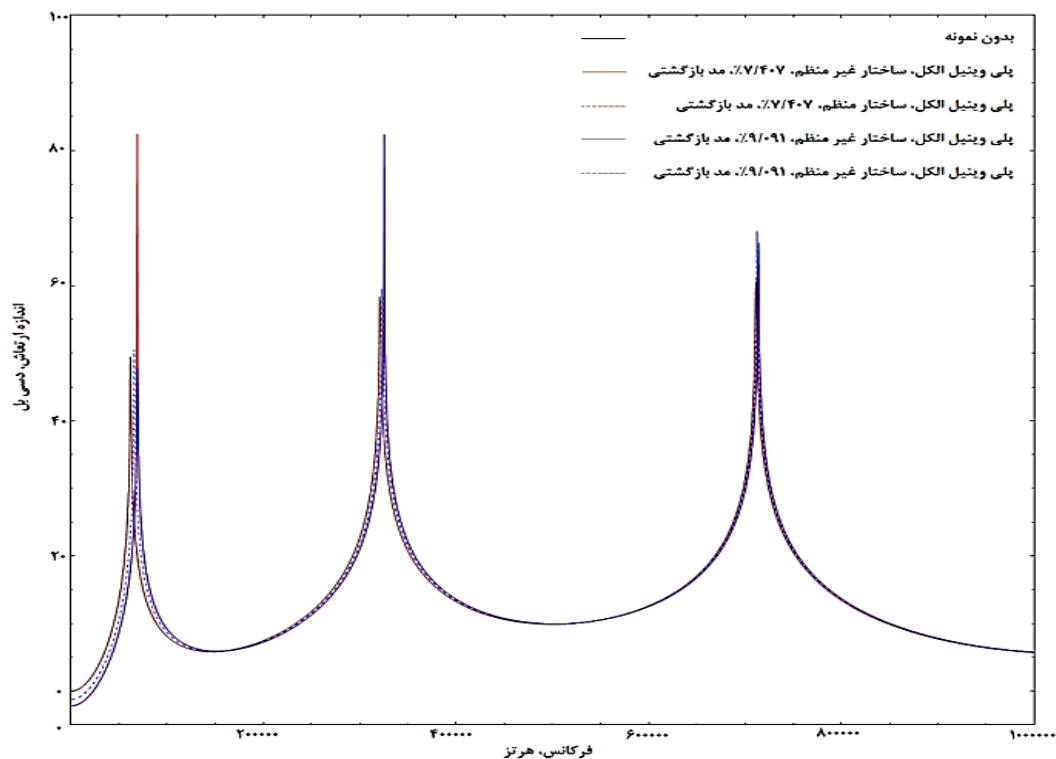


دی ام تی به کاررفته در روش اجزای محدود، برای نمونه‌هایی با چسبندگی کمتر، افزایش می‌یابد. به بیان دیگر، نیروی چسبندگی در حالات مذکور کمتر بوده و در نتیجه، پیش‌بینی فرکانس تشدید میکروتیر با مدل دی ام تی، دقیق‌تر خواهد بود. در حقیقت مدل دی ام تی که برای مدل‌سازی نیروی مابین نوک میکروتیر و سطح نمونه استفاده شده است، برای مقادیر کوچک‌تر نیروی چسبندگی مابین نوک میکروتیر و سطح نمونه دقت بیشتری دارد. روند همگرایی فرکانس‌ها برای یکی از حالات منتخب (بدون نمونه) در جداول ۵ و ۶ بررسی شده است. آن‌گونه که مشخص است با بررسی تغییرات و برآورد میزان خطا از یک سو و مشخص بودن مقادیر حدودی فرکانس‌ها از روش تجربی (منطبق بر مقادیر پیشنهادی از سوی سازنده میکروتیر برای حالت بدون نمونه) از سوی دیگر (برای حالت بدون نمونه) مقدار حدودی تعداد المان‌ها را می‌توان در ابتدا تخمین زد و سپس با اعمال تغییرات روی یکی (مثلاً قسمت مستطیلی) و ثابت نگه داشتن دیگری مقدار دقیق تعداد المان را به دست آورد. البته تعیین تعداد المان با این روش بسیار طولانی و وقت‌گیر است، چراکه باید مقادیر مختلف تعداد المان‌ها بارها امتحان شوند تا به مقدار مطلوب آن‌ها برسیم.

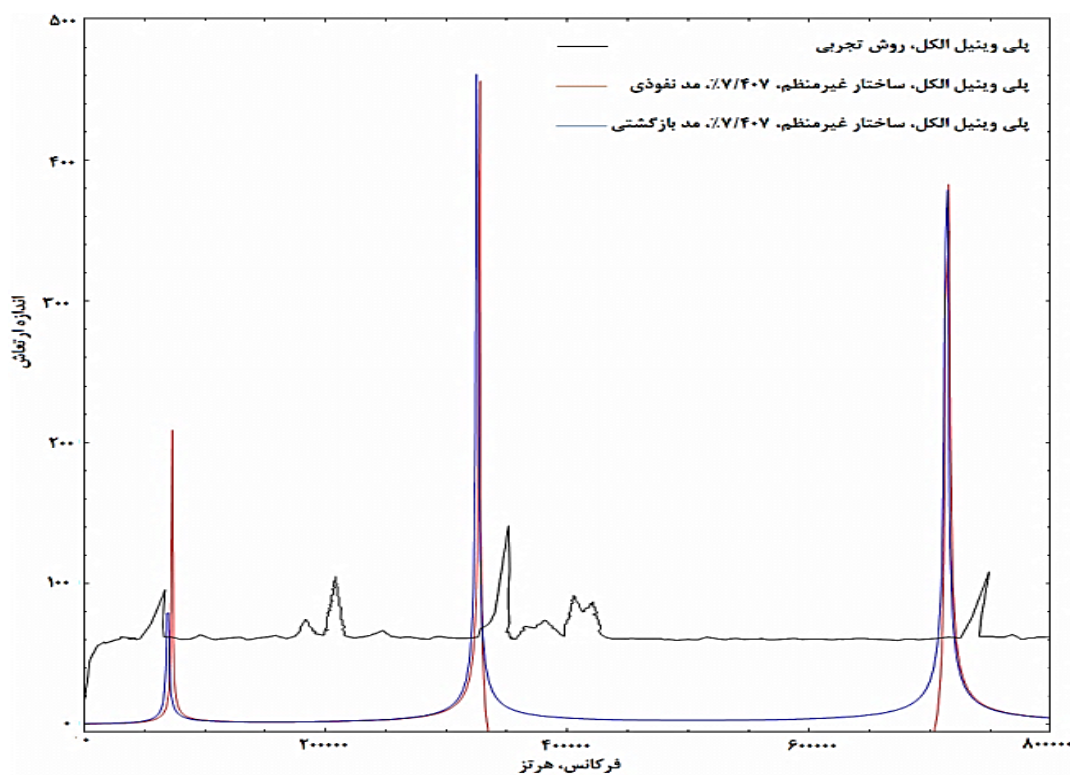
مدول کشسانی نمونه‌ها سبب افزایش فرکانس تشدید میکروتیر خواهد شد. طبق شکل‌های ۸ و ۹ با افزایش مدول کشسانی، اندازه پاسخ فرکانسی در جهت جابه‌جایی عمودی میکروتیر وی شکل نیز افزایش می‌یابد. در نتیجه، اندازه پاسخ فرکانسی در جهت جابه‌جایی عمودی میکروتیر وی شکل برای نمونه‌هایی با غلظت بالای پلی‌وینیل الکل، الیاف با داربست غیرمنظم و در نهایت، مد نفوذی میکروسکوپ، از سایر حالات بزرگ‌تر است. جدول ۳ بیانگر مقادیر فرکانس تشدید میکروتیر با استفاده از روش تجربی و دقیقاً مشابه پیش‌بینی‌های جدول ۲ بوده که از روش اجزای محدود به دست آمده است؛ یعنی همانند جدول ۲، فرکانس تشدید میکروتیر برای نمونه‌های با الیاف با داربست غیرمنظم، غلظت بیشتر پلی‌وینیل الکل و در نهایت، مد نفوذی میکروسکوپ بزرگ‌تر نسبت به سایر حالات است. شکل‌های ۱۰ تا ۱۳ و همچنین جدول ۴ بیانگر مقایسه روش‌های اجزای محدود و تجربی هستند و به‌طور کلی، انطباق قابل قبولی را بین نتایج و روش‌های اجزای محدود و تجربی نشان می‌دهند. مطابق شکل‌های ۱۰ تا ۱۳ و جدول ۴، در نتایج ناشی از روش‌های تجربی و اجزای محدود برای حالات الیاف با داربست غیرمنظم و مد نفوذی، میزان خطا کمتر از سایر حالات است. دلیل این امر، ناشی از این است که دقت مدل



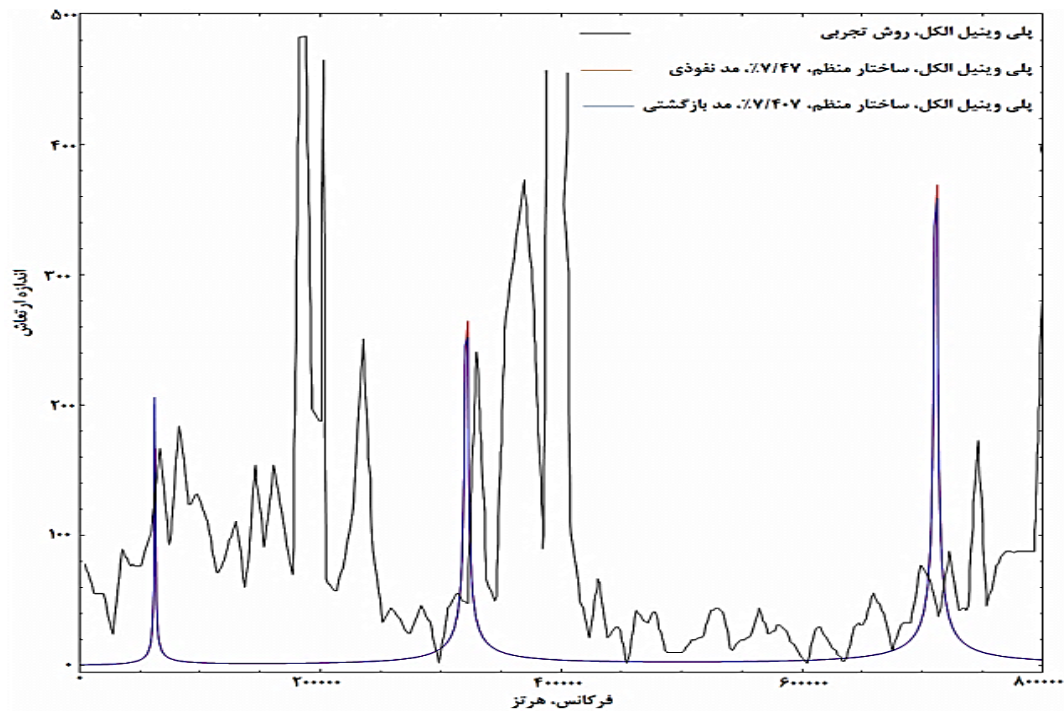
**شکل ۸:** نمودار اندازه پاسخ فرکانسی جهت جابه‌جایی عمودی بر مبنای فرکانس برای میکروتیر وی شکل با در نظر گرفتن نمونه‌های پلی‌وینیل‌الکل با غلظت‌ها و داربست‌های مختلف در مد نفوذی میکروسکوپ.



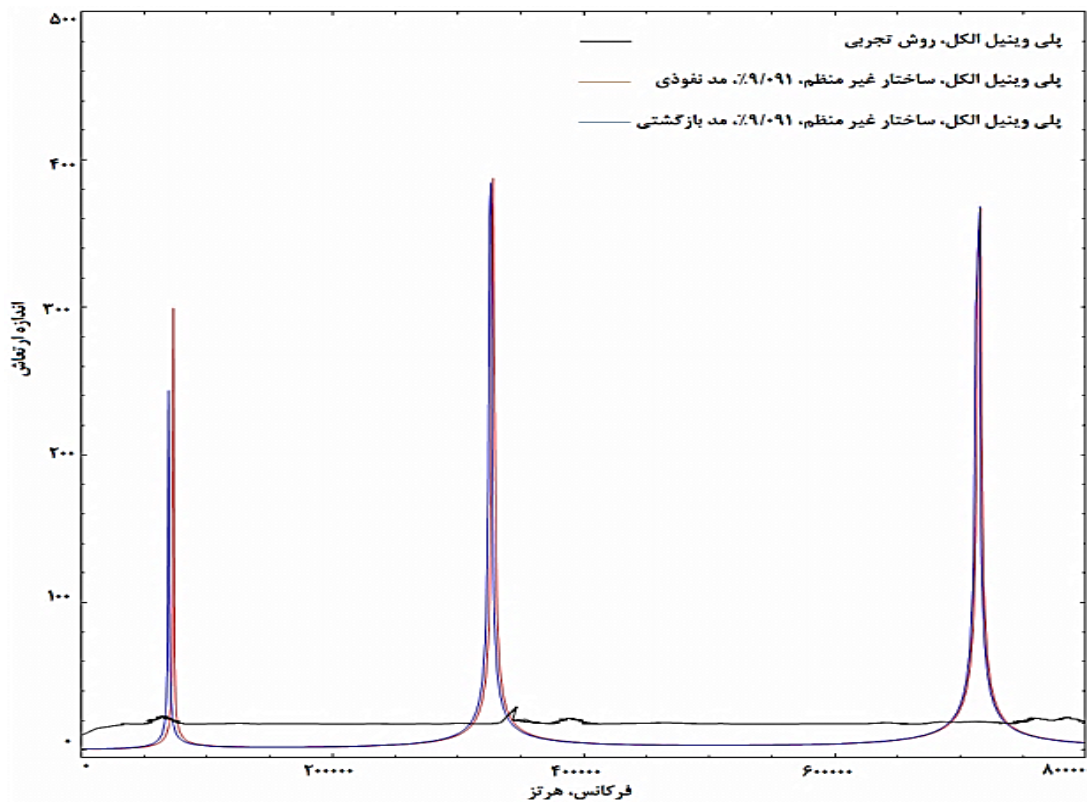
شکل ۹: نمودار اندازه پاسخ فرکانسی جهت جابه‌جایی عمودی بر مبنای فرکانس برای میکروتیر وی شکل با در نظر گرفتن نمونه‌های پلی‌وینیل الکل با غلظت‌ها و داربست‌های مختلف در مد بازگشتی میکروسکوپ.



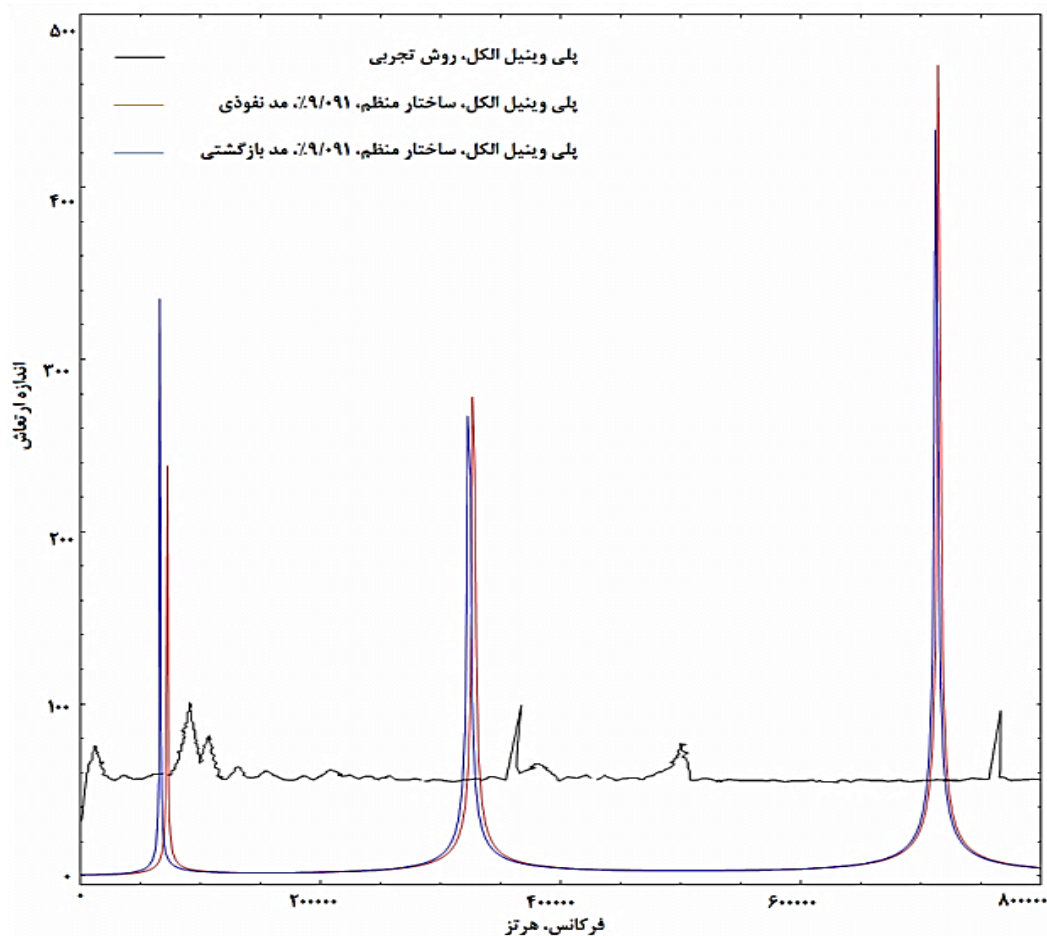
شکل ۱۰: نمودار اندازه پاسخ فرکانسی جهت جابه‌جایی عمودی بر مبنای فرکانس برای میکروتیر وی شکل با در نظر گرفتن نمونه پلی‌وینیل الکل با غلظت ۷/۴۰۷٪ داربست غیر منظم بر مبنای روش‌های اجزای محدود و تجربی



شکل ۱۱: نمودار اندازه پاسخ فرکانسی جهت جابه‌جایی عمودی بر مبنای فرکانس برای میکروتیر وی شکل با در نظر گرفتن نمونه پلی‌وینیل الکل با غلظت ۷/۴۰٪ و داربست منظم بر مبنای روش‌های اجزای محدود و تجربی



شکل ۱۲: نمودار اندازه پاسخ فرکانسی جهت جابه‌جایی عمودی بر مبنای فرکانس برای میکروتیر وی شکل با در نظر گرفتن نمونه پلی‌وینیل الکل با غلظت ۹/۹۱٪ و داربست غیر منظم بر مبنای روش‌های اجزای محدود و تجربی



شکل ۱۳: نمودار اندازه پاسخ فرکانسی جهت جابه‌جایی عمودی بر مبنای فرکانس برای میکروتیر وی شکل با در نظر گرفتن نمونه پلی‌وینیل الکل با غلظت ۹۱/۰۹٪ و داربست منظم بر مبنای روش‌های اجزای محدود و تجربی

جدول ۱: مدول کشسانی و نیروی چسبندگی نانو الیاف پلی‌وینیل الکل به ازای غلظت‌ها و داربست‌های مختلف

نیروی چسبندگی، مد بازگشتی (نانو نیوتن)	نیروی چسبندگی، مد نفوذی (نانو نیوتن)	مدول کشسانی، مد بازگشتی (مگا پاسکال)	مدول کشسانی، مد نفوذی (مگا پاسکال)	غلظت پلی وینیل الکل (%)	ساختار نانو الیاف
۲۵/۷۸	۱۰/۱۷	۱۰/۱۵	۱۶/۳۲	۷/۴۰۷	غیرمنظم
۴۴/۳۷	۱۳/۶۴۲	۰/۱۲۶	۰/۲۵۹	۷/۴۰۷	منظم
۱۷/۰۸	۷/۰۷۲	۱۰/۵۷	۱۶/۴۸	۹/۰۹۱	غیرمنظم
۲۸/۰۱	۱۵/۰۵۹	۵/۵۵۶	۱۵	۹/۰۹۱	منظم

**جدول ۲:** فرکانس تشدید برای مدهای اول تا سوم در حالت‌های نفوذی و بازگشتی میکروتیر به ازای غلظت‌ها و داربست‌های مختلف نانو الیاف پلی‌وینیل الکل به‌عنوان نمونه با استفاده از روش اجزای محدود

فرکانس	فرکانس	فرکانس	فرکانس	فرکانس اول، مد نفوذی، هرتز	فرکانس دوم، مد نفوذی، هرتز	غلظت پلی وینیل الکل (%)	ساختار نانو الیاف
۷۱۱۴۲۲/۵۹	۳۲۰۶۹۷/۲۱	۶۲۰۷۰/۴۲	۷۱۱۴۲۲/۵۹	۳۲۰۶۹۷/۲۱	۶۲۰۷۰/۴۲	-----	بدون نمونه
۷۱۳۸۰۹/۹۱	۳۲۵۴۷۱/۸۵	۶۹۲۳۲/۴	۷۱۵۴۰۱/۴۶	۳۲۷۸۵۹/۱۸	۷۳۲۱۱/۲۷	۷/۴۰۷	غیرمنظم
۷۱۱۴۲۲/۵۹	۳۲۱۴۹۲/۹۸	۶۲۰۷۰/۴۲	۷۱۱۴۲۲/۵۹	۳۲۱۴۹۲/۹۸	۶۲۸۶۶/۲	۷/۴۰۷	منظم
۷۱۳۸۰۹/۹۱	۳۲۵۴۷۱/۸۵	۶۹۲۳۲/۴	۷۱۵۴۰۱/۴۶	۳۲۷۸۵۹/۱۸	۷۳۲۱۱/۲۷	۹/۰۹۱	غیرمنظم
۷۱۲۲۱۸/۳۷	۳۲۳۰۸۴/۵۳	۶۶۰۴۹/۳	۷۱۴۶۰۵/۶۹	۳۲۷۰۶۳/۴	۷۲۴۱۵/۴۹	۹/۰۹۱	منظم

**جدول ۳:** فرکانس تشدید با روش تجربی برای مدهای اول تا سوم به ازای غلظت‌ها و داربست‌های مختلف نانو الیاف پلی‌وینیل الکل به‌عنوان نمونه با استفاده از روش اجزای محدود

فرکانس دوم، روش تجربی	فرکانس سوم، روش تجربی	فرکانس اول، روش تجربی	غلظت پلی وینیل الکل (%)	ساختار نانو الیاف
۳۴۲۹۷۰	۷۴۵۱۶۹	۷۱۳۱۶	۷/۴۰۷	غیرمنظم
۳۴۲۰۰۰	۷۲۰۰۰۰	۶۶۶۰۰	۷/۴۰۷	منظم
۳۴۲۴۵۰	۷۵۶۰۵۷	۷۰۹۷۶	۹/۰۹۱	غیرمنظم
۳۸۲۲۰۷	۷۶۲۷۶۷	۸۲۳۷۲	۹/۰۹۱	منظم

**جدول ۴:** میزان خطا مابین روش‌های تجربی و اجزای محدود برای مدهای اول تا سوم به ازای غلظت‌ها و داربست‌های مختلف پلی‌وینیل الکل

خطا مابین فرکانس دوم تجربی با مد نفوذی (%)	خطا مابین فرکانس سوم تجربی با مد بازگشتی (%)	خطا مابین فرکانس اول تجربی با مد بازگشتی (%)	خطا مابین فرکانس اول تجربی با مد بازگشتی (%)	غلظت پلی وینیل الکل (%)	ساختار نانو الیاف
۴/۴۰	۵/۱۰	۴/۲۱	۲/۹۲	۷/۴۰۷	غیرمنظم
۵/۹۹	۵/۹۹	۱/۱۹	۶/۸۰	۷/۴۰۷	منظم
۴/۲۶	۴/۹۵	۵/۵۹	۲/۴۵	۹/۰۹۱	غیرمنظم
۱۴/۴۲	۱۵/۴۶	۶/۳۱	۱۹/۸۱	۹/۰۹۱	منظم

غیرمنظم در الیاف به جای ساختار منظم، سبب افزایش سختی ماده و در نتیجه، افزایش مدول کشسانی می شود. در ادامه، رفتار دینامیکی میکروتیر وی شکل میکروسکوپ نیروی اتمی با در نظر گرفتن نانوالیاف پلی وینیل الکل با ساختارها و غلظت های مختلف بررسی شده است. طبق نتایج، با افزایش مدول الاستیک، فرکانس تشدید و اندازه پاسخ فرکانسی جهت جابه جایی عمودی میکروتیر افزایش می یابد. فرکانس تشدید و اندازه پاسخ فرکانسی جهت جابه جایی عمودی برای الیاف با ساختار غیرمنظم، بزرگ تر از الیاف با ساختار منظم است. نتایج تحقیق مدل با نتایج آزمایشگاهی توسط میکروسکوپ نیروی اتمی جی پی کی مقایسه شده که انطباق بسیار خوبی را نشان می دهد.

### فهرست علائم و اختصارات

A	سطح مقطع
$A_0$	سطح مقطع قسمت مستطیلی
$A_1$	سطح مقطع قسمت دوزنقه ای
$b_0$	عرض اولیه قسمت مستطیلی
$b_1$	عرض قسمت اولیه دوزنقه ای
$b_2$	عرض قسمت انتهایی دوزنقه ای
$C_h$	نسبت شیب ارتفاعی
$C_b$	نسبت شیب ارتفاع عرضی
d	فاصله مابین لبه پایینی تیرک با مرکز سطح نوک هرمی شکل
D	فاصله تعادلی بین انتهای نوک هرمی تا سطح نمونه
$E_t$	مدول کشسانی نوک هرمی تیرک
$E_s$	مدول کشسانی سطح نمونه
$E^*$	مدول کشسانی کاهش یافته سطح نمونه
$f_t, f_n$	نیروهای عمودی و مماسی مابین تیرک و سطح نمونه
$f_d$	نیروی هیدرو دینامیکی
$G_t$	مدول برشی نوک هرمی تیرک
$G_s$	مدول برشی سطح نمونه
$G^*$	مدول برشی کاهش یافته سطح نمونه
H	ارتفاع نوک هرمی

**جدول ۵:** تعیین المان مطلوب جهت قسمت مستطیلی با فرض معلوم بودن تعداد المان های قسمت دوزنقه ای و مقادیر فرکانس اول و دوم برای میکروتیر بدون نمونه از روش تجربی

تعداد المان های مستطیلی	تعداد المان های دوزنقه ای	فرکانس اول، مد نفوذی، (Hz)	فرکانس دوم، مد نفوذی، (Hz)
۳۰	۲۵	۶۱۸۶۴/۳۳	۳۱۸۹۲۱/۲۴
۳۱	۲۵	۶۱۹۵۵/۲۱	۳۱۹۵۷۴/۹۶
۳۲	۲۵	۶۲۰۵۵/۶۸	۳۱۹۹۲۱/۶۳
۳۳	۲۵	۶۲۰۶۹/۲۳	۳۲۰۵۸۴/۳۲
۳۴	۲۵	۶۲۰۷۰/۱۲	۳۲۰۶۹۷/۰۲
۳۵	۲۵	۶۲۰۷۰/۴۲	۳۲۰۶۹۷/۲۱

**جدول ۶:** تعیین المان مطلوب جهت قسمت دوزنقه ای با فرض معلوم بودن تعداد المان های قسمت مستطیلی و مقادیر فرکانس اول و دوم برای میکروتیر بدون نمونه از روش تجربی

تعداد المان های مستطیلی	تعداد المان های دوزنقه ای	فرکانس اول، مد نفوذی، (Hz)	فرکانس دوم، مد نفوذی، (Hz)
۳۵	۲۰	۶۱۹۹۳/۹۵	۳۱۹۷۵۱/۲۹
۳۵	۲۱	۶۲۰۳۰/۵۱	۳۲۰۲۵۷/۳۴
۳۵	۲۲	۶۲۰۶۵/۳۵	۳۲۰۵۱۴/۳۹
۳۵	۲۳	۶۲۰۶۹/۱۲	۳۲۰۶۸۴/۲۷
۳۵	۲۴	۶۲۰۷۰/۰۵	۳۲۰۶۹۷/۰۰
۳۵	۲۵	۶۲۰۷۰/۴۲	۳۲۰۶۹۷/۲۱

### ۷- نتیجه گیری

در این تحقیق، رفتار مکانیکی نانوالیاف پلی وینیل الکل با ساختارها و غلظت های مختلف با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی بررسی شده است. بر مبنای نتایج، با افزایش غلظت پلی وینیل الکل، مدول کشسانی افزایش یافته، اما نیروی چسبندگی کاهش می یابد. استفاده از ساختار

[3] Sahin O, Magonov S, Su C, Quate CF, Solgaard O. An atomic force microscope tip designed to measure time-varying nanomechanical forces. *Nature nanotechnology*. 2007;2(8):507-14.

[4] Eslami S, Jalili N. A comprehensive modeling and vibration analysis of AFM microcantilevers subjected to nonlinear tip-sample interaction forces. *Ultramicroscopy*. 2012;117:31-45.

[5] Payam AF. Sensitivity of flexural vibration mode of the rectangular atomic force microscope micro cantilevers in liquid to the surface stiffness variations. *Ultramicroscopy*. 2013;135:84-8.

[6] Korayem MH, Sharahi HJ, Korayem AH. Comparison of frequency response of atomic force microscopy cantilevers under tip-sample interaction in air and liquids. *Scientia Iranica*. 2012;19(1):106-12.

[7] Korayem M, Alipour A, Younesian D. Vibration suppression of atomic-force microscopy cantilevers covered by a piezoelectric layer with tensile force. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2018;32(9):4135-44.

[8] Gholizadeh Pasha A H, Sadeghi A. Modeling of Non-Linear Dynamic Behavior of Tapered Atomic Force Microscope Cantilevers Immersed in Different Liquids Based on Theoretical and Experimental Methods. *Modares Mechanical Engineering*. 2020;21(1):29-37.

[9] Marin E, Rojas J. Evaluation of crosslinking on the water sorption properties of poly (vinyl) alcohol. *Int J Pharm Sci Rev Res*. 2015;35:189.

[10] Cosgun A, Fu R, Jiang W, Li J, Song J, Song X, et al. Flexible quantum dot-PVA composites for white LEDs. *Journal of Materials Chemistry C*. 2015;3(2):257-64.

[11] Kumar A, Han SS. PVA-based hydrogels for tissue engineering: A review. *International Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials*. 2017;66(4):159-82.

[12] Coelho D, Sampaio A, Silva CJ, Felgueiras HP, Amorim MTP, Zille A. Antibacterial electrospun poly (vinyl alcohol)/enzymatic synthesized poly (catechol) nanofibrous midlayer membrane for ultrafiltration. *ACS applied materials & interfaces*. 2017;9(38):33107-18.

[13] Shim E, Su J, Noro J, Teixeira MA, Cavaco-Paulo A, Silva C, et al. Conductive bacterial cellulose by in situ laccase polymerization of aniline. *PloS one*. 2019;14(4):e0214546.

[14] Silva IO, Ladchumananandasivam R, Nascimento JHO, Silva KKO, Oliveira FR, Souto AP, et al. Multifunctional chitosan/gold nanoparticles

ارتفاع اولیه قسمت مستطیلی	$h_0$
ارتفاع قسمت اولیه دوزنقه‌ای	$h_1$
ارتفاع قسمت انتهایی دوزنقه‌ای	$h_2$
ممان اینرسی مقطع اولیه	$I_{y0}$
ممان اینرسی مقطع کاهش یافته	$I_{y1}$
ضریب تصحیح برشی	$k$
سفتی عمودی و مماسی خطی مابین تیرک و سطح نمونه	$k_n, k_t$
سفتی عمودی و مماسی غیر خطی مابین تیرک و سطح نمونه	$k_{n1}, k_{n2}, k_{t1}, k_{t2}$
جرم نوک هرمی تیرک	$m_{tip}$
پارامتر مربوط به میرایی سازه‌ای تیرک	$Q$
شعاع نوک هرمی تیرک	$R_t$
زمان	$t$
متغیر جابجایی طولی	$x$
فاصله بین مولکولی	$Z_0$
متغیر جابجایی عمودی قسمت مستطیلی	$v$
متغیر جابجایی عمودی قسمت دوزنقه‌ای	$w$
زاویه بین تیرک و سطح نمونه	$\alpha$
چگالی تیرک	$\rho$
بسامد دایروی ارتعاشی	$\omega$
متغیر جابجایی چرخشی قسمت مستطیلی	$\psi$
متغیر جابجایی چرخشی قسمت دوزنقه‌ای	$\phi$
اختلاف مابین فاصله بین مولکولی و فاصله تعادلی بین انتهای نوک هرمی تا سطح نمونه	$\delta_0$
عدد پواسون نوک هرمی تیرک	$\nu_t$
عدد پواسون سطح نمونه	$\nu_s$

## ۸- مراجع

- [1] Binnig G, Quate CF, Gerber C. Atomic force microscope. *Physical review letters*. 1986;56(9):930.
- [2] Rabe U, Hirsekorn S, Reinstädler M, Sulzbach T, Lehrer C, Arnold W. Influence of the cantilever holder on the vibrations of AFM cantilevers. *Nanotechnology*. 2006;18(4):044008.



$$[k_b]_e = \int_0^l kGA(x) \begin{bmatrix} N_{1a} \\ N_{2a} \\ N_{3a} \\ N_{4a} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} N_1 \\ N_2 \\ N_3 \\ N_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_{1a} \\ N_{2a} \\ N_{3a} \\ N_{4a} \end{bmatrix} dx \quad (\text{الف ۳})$$

$$\begin{bmatrix} N_{1a} \\ N_{2a} \\ N_{3a} \\ N_{4a} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-1}{1+\phi} (1-4r-\phi r+\phi+3r^2) \\ \frac{-1}{1+\phi} (3r^2-2r+\phi r) \\ \frac{1}{(1+\phi)L} (6r^2-6r) \\ \frac{1}{(1+\phi)L} (6r^2-6r) \end{bmatrix} \quad (\text{الف ۴})$$

$$\begin{bmatrix} N_1 \\ N_2 \\ N_3 \\ N_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{L}{1+\phi} \left( r-r^2 \left( 2+\frac{1}{2}\phi-r \right) + \phi r - \frac{1}{2}\phi \frac{12EI}{kAG(1+\phi)L^3} \right) \\ \frac{-L}{1+\phi} \left( \frac{1}{2}\phi+r^2 \left( 1-\frac{1}{2}\phi \right) - r^3 + \frac{1}{2}\phi \left( \frac{1}{2}\phi r - \frac{1}{2}\phi \right) \frac{12EI}{kAG(1+\phi)L^3} \right) \\ \frac{1}{1+\phi} \left( -r^2(3-2r)+1+\phi(1-r) \frac{12EI}{kAG(1+\phi)L^3} \right) \\ \frac{1}{(1+\phi)} \left( \phi+3r^2-2r^3+\phi(r-1) \frac{12EI}{kAG(1+\phi)L^3} \right) \end{bmatrix} \quad (\text{الف ۵})$$

$$[k]_e = \frac{2EI}{(1+\phi)L^3} \times \begin{bmatrix} L^2(2+A_1+\phi/2) & L^2(1-\phi/2) & -L(3+A_1) & -L(3+A_1) \\ & L^2(2-A_1+\phi/2) & -L(3-A_1) & -L(3-A_1) \\ & & 6 & 6 \\ Sym & & & 6 \end{bmatrix} \quad (\text{الف ۶})$$

ماتریس جرم

$$[m]_e = [m_t]_e + [m_r]_e \quad (\text{الف ۷})$$

که در آن  $[m_t]_e$  و  $[m_r]_e$  به ترتیب ماتریس‌های مربوط به تغییر شکل برشی و اینرسی چرخشی می‌باشند.

$$[m_t]_e = \rho \int \begin{bmatrix} N_1 \\ N_2 \\ N_3 \\ N_4 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} N_1 \\ N_2 \\ N_3 \\ N_4 \end{bmatrix} A(x) dx \quad (\text{الف ۸})$$

coatings for biomedical textiles. *Nanomaterials*. 2019;9(8):1064.

[15] Jahanmard-Hosseiniabadi F, Amani-Tehrani M. Comprehensive Comparison Between Mechanical Properties of Nanofiber Matrix and Single Nanofibers. *Journal of Textiles and Polymers*. 2019;7(2):37-46.

[16] Korayem M, Heidary K, Rastegar Z. The head and neck cancer (HN-5) cell line properties extraction by AFM. *Journal of Biological Engineering*. 2020;14(1):1-15.

[17] Timoshenko S, Goodier J. *Theory of Elasticity*, 3rd McGraw-Hill. New York. 1951:409.

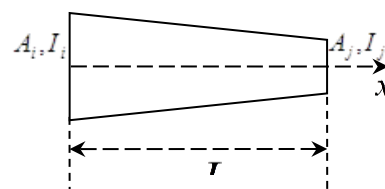
[18] Song Y, Bhushan B. Simulation of dynamic modes of atomic force microscopy using a 3D finite element model. *Ultramicroscopy*. 2006;106(8-9):847-73.

[19] Turner J. Non-linear vibrations of a beam with cantilever-Hertzian contact boundary conditions. *Journal of sound and Vibration*. 2004;275(1-2):177-91.

[20] Cheng FY. *Matrix analysis of structural dynamics: applications and earthquake engineering*: CRC Press; 2017.

## پیوست

ماتریس‌های جرم، سفتی و میرایی جهت تیر تیموشنکو اگر یک تیر دوزنقه‌ای همچون ذیل را در نظر بگیریم، جهت ماتریس‌های سفتی، جرم و میرایی خواهیم داشت [۲۰]:



شکل ۱۴: تیر دوزنقه‌ای موردنظر.

## ماتریس سفتی

$$[k]_e = [k_b]_e + [k_s]_e \quad (\text{الف ۱})$$

$$[k_b]_e = \int_0^l EI(x) \begin{bmatrix} N_{1a} \\ N_{2a} \\ N_{3a} \\ N_{4a} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} N_{1a} \\ N_{2a} \\ N_{3a} \\ N_{4a} \end{bmatrix} dx \quad (\text{الف ۲})$$

$$r_{23} = r_{24} = \frac{\rho l_i}{(1+\phi)^2} \left( \frac{\phi}{5} - \frac{1}{10} \right) + \frac{\rho l_j}{(1+\phi)^2} \left( \frac{3\phi}{10} \right), \quad (\text{الف } 15)$$

$$r_{33} = r_{34} = r_{44} = \frac{\rho l_i}{L(1+\phi)^2} \left( \frac{3}{5} \right) + \frac{\rho l_j}{L(1+\phi)^2} \left( \frac{3}{5} \right),$$

که در آن

$$\phi = \frac{12EI}{kGAL^2}, A_i = \frac{EI_i - EI_j}{EI_i + EI_j}, \bar{EI} = (EI_i + EI_j) / 2$$

### ماتریس میرایی

$$C = \phi^{-T} C_{diag} \phi^{-1}, C_{diag} = \quad (\text{الف } 16)$$

$$diag \left( \frac{\omega_1}{Q_1}, \frac{\omega_2}{Q_2}, \dots, \frac{\omega_n}{Q_n} \right), \phi = [\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_n]$$

$$[m_r]_e = \rho \int \begin{bmatrix} N_{1a} \\ N_{2a} \\ N_{3a} \\ N_{4a} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} N_{1a} \\ N_{2a} \\ N_{3a} \\ N_{4a} \end{bmatrix} I(x) dx \quad (\text{الف } 9)$$

$$[m_t]_e = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & t_{13} & t_{14} \\ & t_{22} & t_{23} & t_{24} \\ & & t_{33} & t_{34} \\ Sym & & & t_{44} \end{bmatrix} \quad (\text{الف } 10)$$

$$t_{11} = \frac{\rho A_i L^3}{(1+\phi)^2} \left( \frac{\phi^2}{240} + \frac{\phi}{105} + \frac{1}{168} \right) + \frac{\rho A_j L^3}{(1+\phi)^2} \left( \frac{\phi^2}{240} + \frac{\phi}{140} + \frac{1}{280} \right),$$

$$t_{12} = \frac{-\rho A_i L^3}{(1+\phi)^2} \left( \frac{\phi^2}{240} + \frac{\phi}{120} + \frac{1}{280} \right) - \frac{\rho A_j L^3}{(1+\phi)^2} \left( \frac{\phi^2}{240} + \frac{\phi}{120} + \frac{1}{280} \right),$$

$$t_{13} = \frac{-\rho A_i L^2}{(1+\phi)^2} \left( \frac{\phi^2}{40} + \frac{5\phi}{84} + \frac{1}{28} \right) - \frac{\rho A_j L^2}{(1+\phi)^2} \left( \frac{\phi^2}{60} + \frac{9\phi}{280} + \frac{1}{60} \right),$$

$$t_{14} = \frac{\rho A_i L^2}{(1+\phi)^2} \left( \frac{\phi^2}{60} + \frac{9\phi}{280} + \frac{1}{70} \right) + \frac{\rho A_j L^2}{(1+\phi)^2} \left( \frac{\phi^2}{40} + \frac{3\phi}{70} + \frac{1}{60} \right), \quad (\text{الف } 11)$$

$$t_{22} = \frac{\rho A_i L^3}{(1+\phi)^2} \left( \frac{\phi^2}{240} + \frac{\phi}{140} + \frac{1}{280} \right) + \frac{\rho A_j L^3}{(1+\phi)^2} \left( \frac{\phi^2}{240} + \frac{\phi}{105} + \frac{1}{168} \right),$$

$$t_{23} = \frac{\rho A_i L^3}{(1+\phi)^2} \left( \frac{\phi^2}{40} + \frac{3\phi}{70} + \frac{1}{60} \right) + \frac{\rho A_j L^3}{(1+\phi)^2} \left( \frac{\phi^2}{60} + \frac{9\phi}{280} + \frac{1}{70} \right),$$

$$t_{24} = \frac{-\rho A_i L^2}{(1+\phi)^2} \left( \frac{\phi^2}{60} + \frac{9\phi}{280} + \frac{1}{60} \right) - \frac{\rho A_j L^2}{(1+\phi)^2} \left( \frac{\phi^2}{40} + \frac{5\phi}{84} + \frac{1}{28} \right),$$

$$t_{33} = \frac{\rho A_i L}{(1+\phi)^2} \left( \frac{\phi^2}{4} + \frac{8\phi}{15} + \frac{1}{7} \right) + \frac{\rho A_j L}{(1+\phi)^2} \left( \frac{\phi^2}{12} + \frac{\phi}{6} + \frac{3}{35} \right),$$

$$t_{34} = \frac{-\rho A_i L}{(1+\phi)^2} \left( \frac{\phi^2}{12} + \frac{3\phi}{20} + \frac{9}{140} \right) - \frac{\rho A_j L}{(1+\phi)^2} \left( \frac{\phi^2}{12} + \frac{3\phi}{20} + \frac{9}{140} \right), \quad (\text{الف } 12)$$

$$t_{44} = \frac{\rho A_i L}{(1+\phi)^2} \left( \frac{\phi^2}{12} + \frac{\phi}{6} + \frac{3}{35} \right) + \frac{\rho A_j L}{(1+\phi)^2} \left( \frac{\phi^2}{4} + \frac{8\phi}{15} + \frac{2}{7} \right),$$

$$[m_r]_e = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} \\ & r_{22} & r_{23} & r_{24} \\ & & r_{33} & r_{34} \\ Sym & & & r_{44} \end{bmatrix} \quad (\text{الف } 13)$$

$$r_{11} = \frac{\rho l_i L}{(1+\phi)^2} \left( \frac{\phi^2}{4} + \frac{\phi}{5} + \frac{1}{10} \right) + \frac{\rho l_j L}{(1+\phi)^2} \left( \frac{\phi^2}{12} - \frac{\phi}{30} + \frac{1}{30} \right),$$

$$r_{12} = \frac{\rho l_i L}{(1+\phi)^2} \left( \frac{\phi^2}{12} - \frac{\phi}{12} - \frac{1}{60} \right) + \frac{\rho l_j L}{(1+\phi)^2} \left( \frac{\phi^2}{12} - \frac{\phi}{12} - \frac{1}{60} \right), \quad (\text{الف } 14)$$

$$r_{22} = \frac{\rho l_i L}{(1+\phi)^2} \left( \frac{\phi^2}{12} - \frac{\phi}{30} + \frac{1}{30} \right) + \frac{\rho l_j L}{(1+\phi)^2} \left( \frac{\phi^2}{4} + \frac{\phi}{5} + \frac{1}{10} \right),$$

$$r_{33} = r_{34} = \frac{\rho l_i}{(1+\phi)^2} \left( \frac{3\phi}{10} \right) + \frac{\rho l_j}{(1+\phi)^2} \left( \frac{\phi}{5} - \frac{1}{10} \right),$$



## Numerical and Experimental Analysis of V-shaped Atomic Force Microscope Cantilever Vibrations by Considering Polyvinyl Alcohol Nanofibers as the Sample

Iraj Rezaei<sup>1</sup>, Ali Sadeghi<sup>2\*</sup>

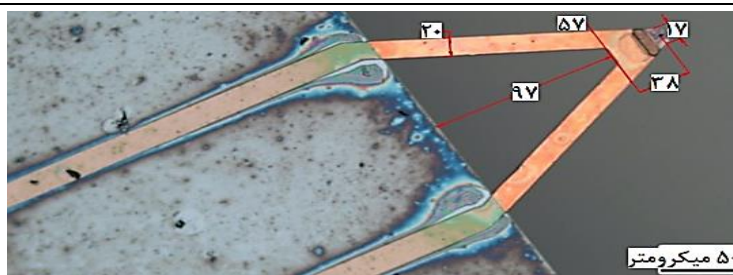
<sup>1</sup> Ph.D. Student, Faculty of Engineering, Islamic Azad University Damavand Branch, Damavand, Iran

<sup>2</sup> Assistant Professor, Faculty of Engineering, Islamic Azad University Damavand Branch, Damavand, Iran

### HIGHLIGHTS

- By increasing the PVA concentration, the elasticity modules increase, but adhesion decreases.
- Increasing the elasticity modules of the samples increases the resonant frequency and amplitude of FRF of vertical movement of the beam.

### GRAPHICAL ABSTRACT



### ARTICLE INFO

#### Article history:

Article Type: Research paper

Received: 12 July 2021

Received in revised form: 18 November 2021

Accepted: 6 December 2021

Available online: 20 January 2021

\*Correspondence:

a\_sadeghi@damavandiau.ac.ir

#### How to cite this article:

I. Rezaei, A. Sadeghi. Numerical and experimental analysis of V-shaped atomic force microscope cantilever vibrations by considering polyvinyl alcohol nanofibers as the sample. *Journal of Aerospace Mechanics*. 2022; 18(1):105-122.

#### Keywords:

Atomic force microscope

V-Shaped cantilever

Poly Vinyl Alcohol

Timoshenko beam theory

Elastic modulus.

### ABSTRACT

In this study, the vibrational behavior of V shaped AFM beam by supposing poly vinyl alcohol (PVA) nanofibers scaffolds with different formats and PVA concentrations as the soft samples has been investigated. Based on the importance of polyvinyl alcohol nanofibers and their application in medical sciences and industry, it seems necessary to consider an independent study on the vibrational behavior of atomic force microscope cantilevers considering polyvinyl alcohol nanofibers. After making of PVA nanofibers scaffolds with different formats and PVA concentrations by electrospinning system, the elasticity modules and adhesions of the samples have been earned in extend and retraction strokes as the most important step to study the vibrational behavior of the AFM beam. To investigation for the mechanical behavior of PVA nanofibers scaffolds with different formats JPK SPM (version spm-5.0.96) software has been used. By increasing the PVA concentration, the elasticity modules increase, but adhesion decreases. Applying the extend strokes increases the elasticity modules, but decrease the adhesion. For theoretical dynamic behavior of V shaped AFM beam, Timoshenko beam theory has been applied. In the present study, the elastic modulus of poly vinyl alcohol (PVA) nanofibers scaffolds with different formats and PVA concentrations has been defined using AFM, then the vibrational behavior of V shaped AFM cantilever by supposing PVA nanofibers as the soft sample has been studied using finite element modeling (FEM) and experimental method. The obtained results by FEM modeling show that increasing the elasticity modules of the samples increases the resonant frequency and amplitude of FRF of vertical movement of the beam. The results by theoretical modeling have been compared with experimental method. The results show excellent agreement.

