مقاله پژوهشی

توسعه میکروسکوپ نیروی اتمیِ ماکرومقیاس مبتنی بر تنظیم دامنه

امیر برندک
کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک
دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران
amir.barandak@ut.ac.ir

آرش بهرامی*
دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک
دانشگاه تهران
arash.bahrami@ut.ac.ir

علی صدیقی
استادیار دانشکده مهندسی مکانیک
دانشگاه تهران
asadighi@ut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۵/۲۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۶/۱۲

چکیده

در این پژوهش، طراحی، ساخت و ارزیابی یک میکروسکوپ نیروی اتمی در ابعاد بزرگ با هدف ایجاد بستری کم‌هزینه برای آموزش و پژوهش ارائه شده است. بر خلاف میکروسکوپ نیروی اتمی متداول، در این میکروسکوپ از عملگر پیزوالکتریک و حسگر نورانی استفاده نمی‌شود. بلکه با برهم‌کنش آهنربای متحرک و سیم‌پیچ و بر اساس اثر هال، همزمان خودحسگری و خودعملگری صورت می‌پذیرد. در این سامانه، با استفاده از یک تیر یکسرگیردار، سیم‌پیچ و آهنربا، ارتعاشات تیر در مود تنظیم اندازه دامنه ایجاد و کنترل می‌شود. طراحی مکانیکی و الکترومغناطیسی سامانه با تحلیل عددی، شبیه‌سازی و ساخت نمونه آزمایشگاهی انجام می‌شود و پس از شناسایی دینامیکی، یک کنترل‌کننده انتگرالی روی برد توسعه آردوئینو پیاده‌سازی می‌گردد. سپس دستگاه با استفاده از یک قطعه مرجع، کالیبره و عملکرد آن در تصویربرداری از توپوگرافی سطح ارزیابی می‌شود. نتایج نشان داد که میکروسکوپ قادر به تشخیص تغییرات سطح با رزولوشن افقی ۱/۱ میلی‌متر و رزولوشن عمودی ۰/۲ میلی‌متر است. نتایج حاصل، بیانگر آن است که سامانه طراحی‌شده، با وجود هزینه ساخت پایین و ساختار ساده، بستر مناسبی برای آموزش، توسعه روش‌های کنترلی و بهبود نسل آینده میکروسکوپ‌های نیروی اتمی فراهم می‌کند.

واژگان کلیدی: میکروسکوپ نیروی اتمی، مکاترونیک، کنترل اندازه دامنه، خودحسگری، خودعملگری

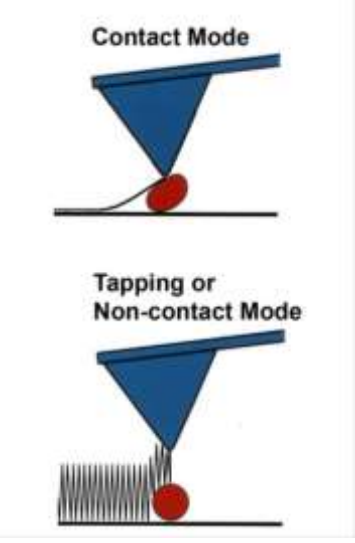
۱. مقدمه

ساخت ابزاری برای دیدن ذرات کوچک موجود در طبیعت، از نخستین اقدامات پژوهشی انسان محسوب می‌شود. اولین میکروسکوپ تاریخ بشر در قرن شانزدهم هجری توسط گالیله[1] ساخته شد [۱]. این میکروسکوپ با استفاده از دو لنز و ساخته شده از چرم و چوب، اولین اقدام جدی در زمینه ساخت میکروسکوپ به شمار می‌آید. با گذشت زمان و دست‌یابی به یافته‌های علمی جدید، شکل‌های نوینی از میکروسکوپ ساخته شد که هریک نسبت به نسخه قبلی پیشرفت‌های چشم‌گیری داشتند. برای مثال در قرن هجدهم میلادی با توسعه دستاوردهای نو در زمینه ساخت و به کارگیری لنزها،

* نویسنده مسئول

میکروسکوپ‌های دقیق‌تری ساخته شد. در قرن بیستم میلادی با ظهور روش‌های ایجاد تفکیک میان بخش‌های تصویر، تشخیص سیگنال‌های بسیار ضعیف توسط میکروسکوپ‌ها میسر شد و سرانجام در چند دهه اخیر با به‌کارگیری روش‌های نوین، دست‌یابی به رزولوشن در محدوده نانومتر به صورت تجربی امکان‌پذیر شده است [۲]. در میکروسکوپ‌های کلاسیک عموماً از روش‌های مستقیم استفاده می‌شود و به کمک لنز یا عدسی، بزرگ‌نمایی سلول‌های مواد و مصور کردن آن‌ها انجام می‌شود. اما در گروه دیگری از میکروسکوپ‌ها به کمک روش‌های غیرمستقیم و استفاده از کمیت‌های فیزیکی قابل اندازه‌گیری، تصویر نمونه ترسیم می‌شود. به عنوان نمونه، در اولین نسخه میکروسکوپ تونلی روبشی[۲] به کمک تنظیم جریان الکترونی میان نوک میکروسکوپ و اتم‌های نمونه، که تابعی نمایی از فاصله نوک میکروسکوپ و اتم‌های نمونه است، فاصله هر نقطه از اتم‌های نمونه تا نوک میکروسکوپ تخمین زده می‌شود. به این ترتیب تصویر ساختار اتمی مواد ترسیم می‌شود [۳]. با ادامه تحقیقات در موضوع تصویربرداری غیرمستقیم و به کمک نیروهای بین اتمی، سرانجام اولین نمونه میکروسکوپ نیروی اتمی[۳] در فاصله کوتاهی معرفی شد. روش تصویربرداری در این میکروسکوپ بسیار مشابه میکروسکوپ تونلی روبشی است اما به جای استفاده از جریان الکترونی، مقدار نیروهای واندروالس[۴] میان نوک میکروسکوپ و اتم‌های نمونه ثابت نگه داشته می‌شود [۴]. بدین ترتیب امکان تصویربرداری از سطوح نارسانا نیز فراهم می‌گردد.

در نمونه اولیه میکروسکوپ نیروی اتمی، نوک تیز میکروسکوپ همواره در تماس با سطح نمونه نگاه داشته می‌شد و اصطلاحاً از مود تماسی استفاده می‌گردید. اما با گسترش استفاده از این میکروسکوپ و انجام پژوهش‌های جدید، مودهای کاری جدیدی برای این نوع میکروسکوپ ابداع شد که منجر به بهبود عملکرد و افزایش حساسیت و رزولوشن تصویربرداری گردید. در نخستین تلاش برای تعریف مود جدید تصویربرداری، مود ضربه‌ای با هدف کاهش تأثیر نیروی اصطکاک سطح، حساسیت بیشتر نسبت به نیروی واندروالس، و جلوگیری از آسیب به نمونه توسط نوک تیز میکروسکوپ، معرفی شد. در این مود، میکروتیر میکروسکوپ به گونه‌ای تحریک می‌شود که در نزدیکی نمونه و در حوالی بسامد تشدید خود نوسان کند. در این صورت، نوک تیز میکروتیر دامنه نوسانات بزرگی نسبت به ابعاد خود دارد که در اثر تغییر نیروی خارجی، مقدار این دامنه تغییر کرده و مبنای مناسبی برای تخمین نیرو و فاصله اتمی می‌باشد [۵]. شکل ۱ درک شهودی مناسبی از تفاوت این دو مود کاری ارائه می‌کند.



شکل ۱. مقایسه مود کاری تماسی و ضربه‌ای [۶]

مطالعات وسیعی در زمینه شناخت دقیق‌تر و گسترش استفاده از مود ضربه‌ای در میکروسکوپ‌های نیروی اتمی صورت گرفته و امروزه تصویربرداری‌های دقیق با رزولوشن بالا در این مود صورت می‌پذیرد. متغیر مورد استفاده در این مود تصویربرداری بسته به کاربرد مورد نیاز و امکانات سخت‌افزاری، می‌تواند اندازه دامنه نوسان، بسامد نوسان و حتی فاز نوسان باشد. به این ترتیب می‌توان مودهای کاری اصلی میکروسکوپ نیروی اتمی را به دو دسته مود اندازه دامنه و مود بسامد تقسیم کرد [۷]. در مود کاری اندازه دامنه، بسامد نوسان ثابت نگاه داشته می‌شود و از تغییرات اندازه دامنه برای نگاشت شکل سطح مورد تصویربرداری استفاده می‌شود، برعکس در مود بسامد، با ثابت نگاه داشتن اندازه دامنه نوسانات توسط یک حلقه بازخورد کنترلی، تغییرات بسامد مورد ارزیابی قرار می‌گیرد [۸]. مود کاری اندازه دامنه با قابلیت پیاده‌سازی بیشتر و پیچیدگی کمتر، بهترین انتخاب برای کاربردهایی است که به رزولوشن چندان بالایی نیاز ندارد در حالی که با استفاده از مود بسامد، با پیچیدگی بیشتر، رزولوشن و دقت تصویربرداری بهتری فراهم می‌آید. علاوه بر مود کاری، هندسه و مشخصات فیزیکی تیر به کار رفته از عوامل تعیین کننده در پاسخ فرکانسی و کیفیت تصویربرداری این نوع میکروسکوپ به شمار می‌رود، به نحوی که مطالعه هندسه تیر و حتی استفاده از مواد کامپوزیتی چندلایه و بررسی تغییرات پاسخ فرکانسی، مبنای انجام پژوهش‌های بسیاری است [۹].

ابعاد بسیار کوچک میکروسکوپ در موارد بسیاری باعث ایجاد محدودیت در ساخت و استفاده از آن در کاربردهایی خاص می‌شود، برای مثال محدود بودن بازه کاری برای تصویربرداری از بایوفیلم‌ها منجر به ایجاد تغییراتی در این نوع میکروسکوپ گردیده است [۱۰]. در پژوهش حاضر، با توجه به پیچیدگی‌ها و هزینه بالای ساخت میکروسکوپ نیروی اتمی در ابعاد واقعی، تصمیم بر ساخت یک نمونه بزرگ‌تر که هزینه ساخت بسیار کمتری دارد گرفته شد. در طراحی و ساخت میکروسکوپ نیروی اتمی در ابعاد بزرگ از نمونه مشابه آن در دانشگاه ام‌آی‌تی[۵] الهام گرفته شده است. میکروسکوپ ام‌آی‌تی متشکل از یک تیر یکسرگیردار از جنس فسفربرنز، یک سیم‌پیچ و آهنربای نصب شده روی تیر می‌باشد. با حرکت تیر، آهنربا در مجاورت سیم‌پیچ به حرکت در می‌آید و بر مبنای اثر هال[۶] در داخل سیم‌پیچ ولتاژ القاء می‌شود. با کنترل جریان درون سیم‌پیچ و ایجاد نیروی تحریک هارمونیک، تیر در حالت تشدید قرار گرفته و تغییرات این ارتعاشات در تعامل با سطح نمونه مورد مطالعه قرار می‌گیرد. این میکروسکوپ در مود کاری بسامد مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۱].

با توجه به بهره گرفتن از برد توسعه ساده و ارزان آردوئینو اونو[۷] جهت پیاده‌سازی الگوریتم کنترلی، مود اندازه دامنه جایگزین مود بسامد گردیده است. این نکته در کنار متفاوت بودن سخت افزار استفاده شده، وجوه اصلی تمایز و نوآوری این پژوهش در مقایسه با نمونه مشابه است که مستقیماً باعث هزینه ساخت بسیار پایین‌تر شده است. در پژوهش‌های آتی با تغییر سخت‌افزار کنترلی، امکان استفاده از میکروسکوپ در مود کاری تنظیم بسامد نیز وجود خواهد داشت. هردو مود ذکر شده فوق زیرمجموعه مود ضربه‌ای به شمار می‌رود بنابر این میکروسکوپ فوق برای استفاده در مود ضربه‌ای ساخته شده است. این میکروسکوپ نخستین

نسخه ماکرومقیاس میکروسکوپ نیروی اتمی است که در مود تنظیم اندازه دامنه کار می‌کند.

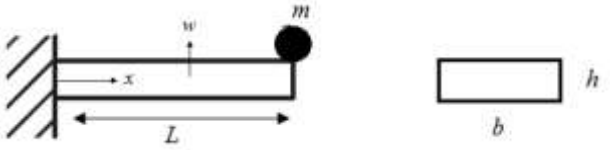
۲. طراحی مکانیکی و ساخت

برای طراحی سازه مکانیکی میکروسکوپ، در نظر گرفتن دینامیک تیر یکسرگیردار و انتخاب مناسب ابعاد و مشخصات تیر از اهمیت بالایی برخوردار است. با توجه به محدودیت‌های فیزیکی و پهنای باند سامانه مکاترونیکی به کار رفته برای تحریک تیر، هدف طراحی یک تیر یکسرگیردار با بسامد طبیعی اول کمتر از ۵۰ هرتز است. بر اساس یک قاعده کلی، بسامد داده‌برداری و کنترل یک سامانه باید ۱۰ برابر بیشترین مؤلفه بسامدی سامانه باشد [۱۲]. مبنای انتخاب بسامد طبیعی ۵۰ هرتز لزوم قابلیت دست‌یابی عملی به بسامد ۵۰۰ هرتزی در حلقه کنترلی با در نظر گرفتن محدودیت‌های کنترل‌گر است. همچنین، نظر به لزوم ایجاد تشدید در تیر، میرایی تیر تا حد امکان باید کم باشد تا تشدید به خوبی ایجاد شود و ارتعاشات تیر میرا نشود، علاوه بر آن، سبک بودن تیر برای افزایش حساسیت الزامی است. از این رو، یک ورق با ضخامت ۰/۲ میلی‌متر و از جنس فسفربرنز برای ساخت تیر استفاده می‌شود. این ماده علاوه بر چگالی کم، دارای میرایی کمتری نسبت به سایر ورق‌ها می‌باشد. مشخصات هندسی و مکانیک تیر در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. مشخصات هندسی و مکانیکی تیر

m (آهنربا) (gr)	۰/۸
L (mm)	۳۸
b (mm)	۶/۳
h (mm)	۰/۲
E (GPa)	۱۱۷
ρ (kg/m^3)	۸۸۶۰

تیر یکسرگیردار به همراه جرم متمرکز در انتهای آن در شکل ۲ نمایش داده شده است (آهنربا به عنوان جرم متمرکز فرض شده است). بر اساس فرضیات اویلر-برنولی و کرنش‌های خطی مدل می‌شود.



شکل ۲. شماتیک تیر یکسرگیردار مورد استفاده

معادله حرکت و شرایط مرزی تیر مرتعش با جرم متمرکز در انتها به صورت زیر به دست می‌آید [۱۳]:

$$EI\frac{\partial^4 w(x,t)}{\partial x^4}+\rho A\frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial t^2}=0 \qquad (۱)$$

$$w(0,t)=0\,,\frac{\partial w}{\partial x}(0,t)=0\,,\frac{\partial^2 w(L,t)}{\partial x^2}=0$$

$$EI\frac{\partial^3 w(L,t)}{\partial x^3}=m\frac{\partial^2 w(L,t)}{\partial t^2} \qquad (۲)$$

در این معادله، $w(x,t)$ خیز تیر است که تابعی از زمان t و مختصات در راستای محور طولی تیر x می‌باشد. به علاوه، E مدول کشسانی و ρ چگالی ماده تشکیل دهنده تیر است. همچنین، A و I به ترتیب سطح مقطع و گشتاور دوم سطح مقطع تیر می‌باشد. با استفاده از روش جداسازی متغیرها، معادله حرکت ۱ با اعمال شرط مرزی ۲، حل می‌شود. با حل مسئله مقدار ویژه معادله مشخصه به دست می‌آید:

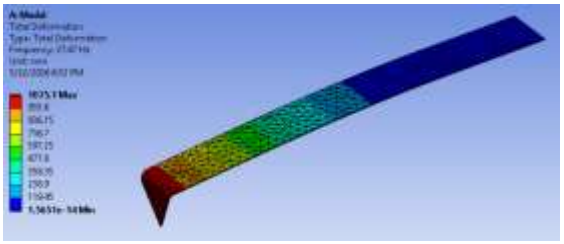
$$(\cos(\beta L)+\cosh(\beta L))\times$$

$$[-EI\beta^3(\cos(\beta L)+\cosh(\beta L))+ m\omega^2(\sin(\beta L)-\sinh(\beta L))] -(\sin(\beta L)+\sinh(\beta L))\times [EI\beta^3(sin(\beta L)-\sinh(\beta L))+ m\omega^2(\cos(\beta L)-\cosh(\beta L))]=0 \quad (۳)$$

در این معادله به صورت زیر تعریف شده است:

$$\omega=\beta^2\sqrt{\frac{EI}{\rho A}}=2\pi f \quad (۴)$$

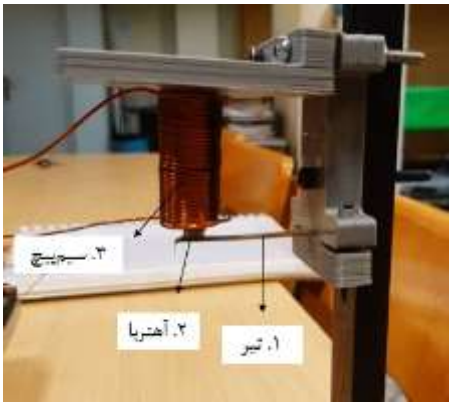
با حل عددی معادله فوق، اولین مقدار β برابر ۲۸/۶۹ به دست می‌آید که با استفاده از رابطه ۴ متناظر با بسامد طبیعی $f=$ ۲۷/۴۹ Hz می‌باشد. برای اطمینان از صحت عدد به دست آمده، مقدار بسامد طبیعی اول با انجام تحلیل اجزا محدود نیز تعیین شده و مقدار بسامد به دست آمده از این دو روش مقایسه می‌شود.



شکل ۳. تحلیل اجزا محدود مودال

همان‌طور که در شکل ۳ مشهود است، مقدار بسامد طبیعی اول در این روش برابر ۲۷/۴۷ هرتز به دست آمد. اختلاف این مقدار با حل تحلیلی انجام شده تنها ۰/۰۲ هرتز می‌باشد که نشانه صحت محاسبات است. بنابر این طراحی صورت گرفته الزام کمتر بودن بسامد طبیعی اول از مقدار ۵۰ هرتز را به خوبی برآورده می‌کند.

سازه کلی میکروسکوپ که وظیفه نگه‌داری اجزای مکانیکی در کنار یکدیگر و قراردهی و تنظیم تیر روی نمونه مورد نظر را دارد، در محیط سه‌بعدی طراحی و با استفاده از پرینتر سه‌بعدی و از جنس پی اِل اِی[8] ساخته شده است. سیم‌پیچ استفاده شده از ۳۰ دور پیچاندن سیم لاکی با قطر ۱/۰۲ میلی‌متر به دور محوری با قطر ۱۴/۵ میلی‌متر و استفاده از چسب سریع ساخته شده است. تعداد دور سیم‌پیچ و قطر سیم آن، با انجام آزمون و خطا و با در نظر گرفتن بازه ۵ ولتی مبدل آنالوگ به دیجیتال انتخاب شد. با افزایش تعداد دور سیم‌پیچ و یا کاهش قطر سیم، مقاومت آن افزایش یافته و اختلاف پتانسیل الکتریکی دو سر آن به ازای عبور جریان یکسان افزایش می‌یابد، از سویی با کاهش تعداد دور و یا افزایش قطر سیم، قدرت میدان مغناطیسی برای حرکت دادن تیر کافی نیست. در نهایت با نصب یک آهنربای استوانه‌ای نئودیومی[9] درجه ۴۲ در انتهای تیر، ساخت سازه فیزیکی پایان می‌یابد. فاصله اولیه آهنربا از سیم‌پیچ حدود ۱/۸میلی‌متر است. تصویر سازه میکروسکوپ پس از ساخت و مونتاژ در شکل ۴ قابل مشاهده است.

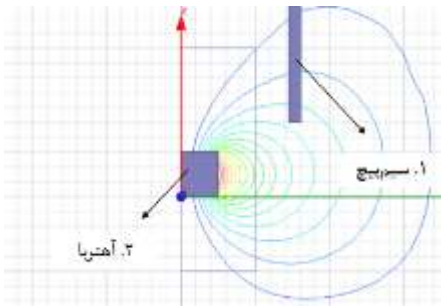


شکل ۴. سازه میکروسکوپ مونتاژ شده

۳. طراحی الکترومغناطیسی

پس از ساخت سازه مکانیکی، تحلیل عملکرد بخش مغناطیسی میکروسکوپ و طراحی مدار الکتریکی متناسب با آن انجام می‌شود. با توجه به مشخص بودن ابعاد و مشخصات فیزیکی سیم‌پیچ و آهنربای به کار رفته، با انجام

شبیه‌سازی در محیط نرم‌افزار انسیس ماکسول[10]، مقدار نیروی قابل اعمال بر تیر و مقدار ولتاژ القا شده[11] درون سیم‌پیچ به واسطه ارتعاشات و سرعت آهنربا محاسبه می‌شود. هدف، استفاده از همین ولتاژ القایی برای دست‌یابی به اطلاعات مورد نیاز در رابطه با ارتعاشات تیر (نظیر بسامد و اندازه دامنه) است. در واقع، در این میکروسکوپ بدون استفاده از حسگر مجزا، تنها با برهم‌کنش سیم‌پیچ و آهنربا، عملکرد خودحسگری و خودعملگری هم‌زمان فراهم می‌شود. با فرض عبور جریان حداکثر یک آمپر از سیم‌پیچ، خطوط شار میدان مغناطیسی در شبیه‌سازی انجام شده مطابق شکل ۵ به دست می‌آید. با توجه به تقارن موجود در مسئله حول محور عمودی، شبیه‌سازی در ۲ بعد و به صورت صفحه‌ای انجام شده است.



شکل ۵. خطوط شار مغناطیسی بین آهنربا و سیم‌پیچ

با انجام شبیه‌سازی در نرم‌افزار، مقدار نیروی وارد شده به آهنربا در اثر عبور جریان ۱ آمپر از سیم‌پیچ تقریباً برابر ۷ میلی‌نیوتن به دست می‌آید. رابطه ۵ نیز برای محاسبه مقدار این نیرو قابل استفاده است [۱۱].

$$F = pi \qquad (۵)$$

در این رابطه F مقدار نیرو، i جریان عبوری و p ثابت کوپلینگ است که تابعی از مشخصات هندسی و فیزیکی آهنربا و سیم‌پیچ می‌باشد. این مقدار نیرو با توجه به سختی کم تیر و جرم ۰/۸ گرمی آهنربا، برای ایجاد ارتعاش در تیر کافی است. هرچند باتوجه به برابر بودن بسامد تحریک با بسامد طبیعی تیر، انتظار می‌رود با نیروی بسیار کمتر نیز دامنه نوسان قابل قبولی ایجاد شود. در تئوری ارتعاشات، ایجاد تحریک هم بسامد با بسامد طبیعی سامانه، منجر به میل کردن دامنه نوسانات به سمت بی‌نهایت می‌شود. وقوع این پدیده در این سامانه نیز مورد انتظار است. باتوجه به استفاده از یک مبدل آنالوگ به دیجیتال ۱۰ بیتی برای خواندن مقادیر ولتاژ القایی و رزولوشن ۴ میلی‌ولتی آن، و فرض استفاده از تقویت‌کننده سیگنال با بهره ۱۰۰، کم‌ترین مقدار ولتاژ القایی قابل خواندن برابر ۰/۰۴ میلی‌ولت یا ۴۰ میکروولت است. در صورت بیشتر بودن مقدار ولتاژ القایی از این مقدار، طراحی صورت گرفته قابل قبول است. با فرض ایجاد دامنه نوسان حدوداً ۰/۴ میلی‌متری (باتوجه به ابعاد تیر و خاصیت کشسانی آن برآورد شده است) و بسامد نوسانات ۳۰ هرتز (تخمین بر مبنای تحلیل مودال)، حداکثر سرعت حرکت آهنربا برابر ۷۵ میلی‌متر بر ثانیه تخمین زده می‌شود. پس از انجام شبیه‌سازی، مقدار ولتاژ القایی درون سیم‌پیچ حدود ۴۰۰ میکروولت محاسبه می‌گردد.

این مقدار، از حد پایین قابل قبول یعنی ۴۰ میکروولت فاصله مطلوبی دارد. بنابراین، با طراحی یک مدار الکتریکی که توانایی ایجاد و کنترل جریان حداکثر ۱ آمپر و نیز خواندن مقادیر آنالوگ بین ۴۰ و ۴۰۰ میکروولت را داشته باشد، طراحی بخش الکترومغناطیسی میکروسکوپ تکمیل می‌شود. برای خواندن ولتاژ القا شده درون سیم‌پیچ، از ترکیب یک تقویت‌کننده سیگنال (مدل AD620) و یک فیلتر پایین‌گذر مرتبه اول آنالوگ استفاده می‌شود. بهره مناسب تقویت‌کننده با انجام سعی و خطا و متناسب با بازه ۵ ولتی مبدل آنالوگ به دیجیتال تنظیم می‌شود. همچنین بسامد گوشه فیلتر پایین‌گذر، برابر ۵۲/۶۳ هرتز تنظیم شد

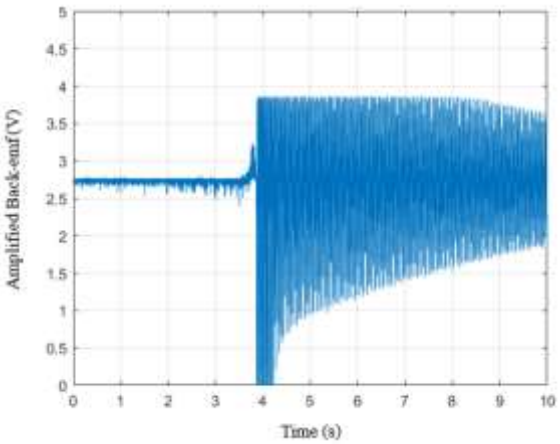
که برای عبور یک سیگنال حدوداً ۳۰ هرتزی بدون وجود اغتشاشات ناخواسته مناسب است.

باتوجه به اینکه تنها مبنای بررسی ارتعاشات سامانه، ولتاژ القا شده درون سیم‌پیچ است که رابطه مستقیمی با سرعت حرکت تیر مرتعش دارد، دیگر مقادیر ولتاژ که همراه با این ولتاژ خوانده می‌شود نامطلوب بوده و باید به نحوی محاسبه و از خوانش حذف گردد. با عبورجریان از سیم‌پیچ، اختلاف ولتاژ دو سمت آن علاوه بر ولتاژ القایی، شامل بخش‌های خودالقایی و مقاومت نیز می‌شود.

$$v(t) = L\frac{di}{dt} + Ri + v_{emf} \qquad (۶)$$

با تخمین مقادیر R و L و خواندن جریان عبوری در هر لحظه، امکان تخمین این ولتاژها و کم کردن آن‌ها از مقدار خوانده شده وجود دارد. بدین ترتیب از تفاضل ولتاژ خوانده شده و ولتاژ تخمین زده شده، مقدار ولتاژ القایی در هر لحظه قابل دست‌یابی است. البته باید توجه داشت که پاسخ سامانه تابعی از بسامد گوشه فیلتر، بهره و مقدار صفر تقویت‌کننده و پهنای باند آن است. بنابر این با فرض مجهول بودن مقادیر مقاومت و ضریب خودالقایی سیم‌پیچ جمعاً ۶ مجهول در مسئله وجود دارد. مقدار این مجهولات با انجام نمونه‌گیری (با تعداد بیش از ۶ نمونه) از ورودی و خروجی سامانه، و استفاده از روش حداقل مربعات به دست می‌آید. انجام عملی این فرآیند نشان‌دهنده تأثیر بالای دمای محیط و مجموعه بر مقدار این ضرایب است. خصوصاً مقدار مقاومت با تغییر دما به صورت محسوسی تغییر می‌کند. بنابراین، با انجام آزمون و خطا، جریان عبوری از سیم‌پیچ که پیش از این تا ۱ آمپر نیز بالا می‌رفت، تا مقدار ۰/۴ آمپر محدود شد تا دمای مقاومت و مقدار آن حین کارکرد میکروسکوپ تغییری نداشته باشد. در نهایت مدار فوق روی یک هزار سوراخ لحیم‌کاری می‌شود و عملکرد مناسب آن در هر دو بخش عملگر و حسگر مورد سنجش قرار می‌گیرد.

همچنین برای بررسی عملکرد بخش حسگر، طی ۱۰ ثانیه داده‌برداری و در حالت سکون تیر، با دست به آن ضربه وارد می‌شود و نمودار ولتاژ القایی درون سیم‌پیچ مطابق شکل ۶ ترسیم می‌شود که نشانه عملکرد صحیح بخش حسگر مدار است.

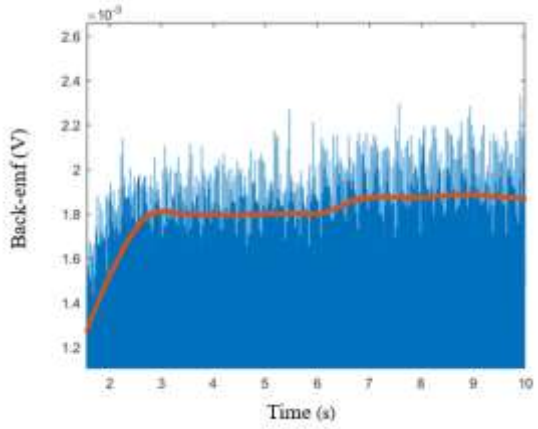


شکل ۶. پاسخ ضربه سامانه

۴. طراحی و پیاده‌سازی کنترل‌گر

هدف در این بخش، طراحی یک کنترل‌گر برای تنظیم مقدار جریان دی‌سی[۱۲] عبوری از سیم‌پیچ، برای ثابت نگاه داشتن اندازه دامنه نوسانات تیر است. به عبارتی با برخورد نوک تیر با برآمدگی روی سطح و کاهش اندازه دامنه نوسان، کنترل‌گر جریان عبوری را کاهش می‌دهد تا با فاصله گرفتن نقطه تعادل نوک تیر از سطح نمونه، فاصله نقطه تعادل و سطح به مقدار قبلی بازگردد و دامنه نوسان ثابت بماند. در واقع کنترل‌گر با دریافت مقدار تغییر اندازه دامنه نوسان نسبت به حالتی که قله یا دره وجود نداشت (خطای ورودی)، اقدام به تنظیم ورودی سامانه یعنی مقدار جریان دی‌سی عبوری از سیم‌پیچ می‌نماید. مقدار این جریان با جریان سینوسی ایجاد کننده ارتعاش جمع شده

و جریان عبوری از سیم‌پیچ را می‌سازد. در گام نخست، لازم است شناسایی سامانه مکاترونیکی طراحی شده صورت پذیرد تا با در دست داشتن تابع تبدیل سامانه، اقدام به طراحی کنترل‌گر شود. از پاسخ پله سامانه برای شناسایی سامانه استفاده می‌شود. با اعمال ورودی پله به سامانه و تغییر مقدار جریان عبوری از ۰/۸ به ۰/۲ آمپر در ثانیه ۶، پاسخ سامانه مطابق شکل ۷ ترسیم می‌گردد.

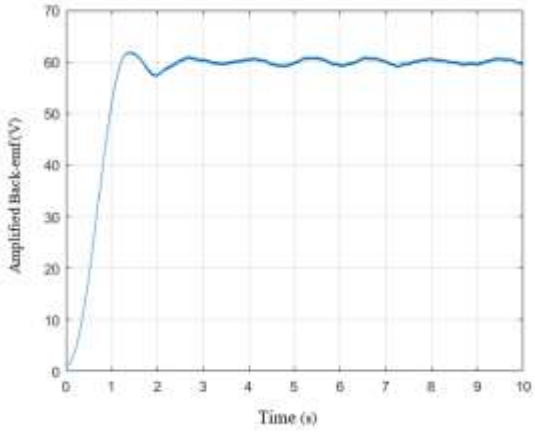


شکل ۷. پاسخ پله سامانه

برای ترسیم این نمودار، از تابع میانگین متحرک[۱۳] استفاده شده است (خط قرمز). به کمک این تابع تخمین مناسبی از اندازه دامنه نوسانات ارائه می‌شود. همانطور که در شکل مشخص است، با کاهش جریان، اندازه دامنه نوسانات افزایش یافته است. با توجه به کوچک بودن مقدار تغییر اندازه دامنه و برای مشاهده‌پذیری بهتر، مقادیر در یک عدد ثابت ضرب شده است تا این اختلاف، قابلیت تشخیص بیشتری داشته باشد. در اولین کوشش برای یافتن مدل ریاضی سامانه، از یک مدل مرتبه اول استفاده شده که دقت کافی نداشت بنابراین از مدل مرتبه دوم برای یافتن تابع تبدیل استفاده شد. تابع تبدیل مدل مرتبه دوم به صورت $P(s) = \frac{-199.7}{s^2+4.33s+16.9}$ به دست می‌آید. پس از طراحی و بررسی پاسخ سامانه به انواع کنترل‌گر از جمله پی‌آی‌دی[۱۴]، در نهایت با بهینه‌سازی پارامترها بهترین کنترل‌گر از نوع انتگرالی انتخاب و طراحی شد. توجه به این نکته حائز اهمیت است که برخلاف کارکردهای معمول کنترل‌گرها که بر مبنای خروجی سامانه بهینه‌سازی می‌شوند، در مسئله حاضر یعنی ساخت میکروسکوپ و تشخیص تغییرات سطح نمونه، متغیر مورد مطالعه خروجی کنترل‌گر (و نه خروجی سامانه) می‌باشد. در صورتی که خروجی کنترل‌گر (جریان دی‌سی عبوری از سیم‌پیچ) اغتشاش و نوسان زیادی داشته باشد، امکان استفاده از این کمیت برای ثبت تغییرات توپوگرافی سطح وجود ندارد. بنابراین، کنترل‌گر باید با سرعتی کم و بدون اغتشاش مقادیر خروجی را تنظیم نماید. هرچند رعایت این نکته سرعت عملکرد را تحت الشعاع قرار می‌دهد اما برای دریافت خروجی قابل قبول الزامی است. انتخاب کنترل‌گر انتگرالی به همین منظور انجام می‌شود تا پایداری و مطلوب بودن خروجی تضمین شود. تابع تبدیل کنترل‌گر طراحی‌شده $G(s) = \frac{-0.04657}{s}$ می‌باشد. به منظور پیاده‌سازی کنترل‌گر طراحی شده روی میکروکنترل‌گر، از روش تاستین[۱۵] برای گسسته سازی روابط و نوشتن کد مربوطه در محیط برنامه‌نویسی استفاده می‌شود. با توجه به بسامد داده‌برداری ۵۰۰ هرتزی، زمان داده‌برداری برابر ۲ میلی‌ثانیه بوده و رابطه کنترل‌گر فوق در حوزه مربوط به متغیر z به شکل $G(z) = \frac{-0.007444z+0.007386}{z-1}$ به دست می‌آید. در نهایت با استفاده از تبدیل معکوس زد[۱۶]، رابطه مربوط به کنترل‌گر انتگرالی فوق در حوزه زمان به شکل رابطه بازگشتی زیر قابل نوشتن است:

$$u[k] = u[k-1] - 0.007444e[k] + 0.007386e[k-1] \quad (۷)$$

مطابق این رابطه، مقدار خروجی کنترل‌گر (جریان سیم‌پیچ) در هر لحظه، تابعی از مقدار خروجی در لحظه قبلی، و خطای سامانه در لحظه فعلی و قبلی است. برای اطمینان از عملکرد مطلوب، پاسخ سامانه حلقه بسته به همراه کنترل‌گر به ورودی ۶۰ ولت در شکل ۸ نمایش داده شده است.

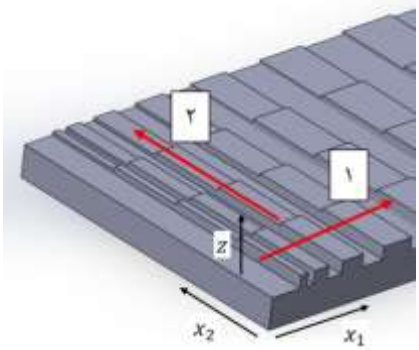


شکل ۸. پاسخ سامانه به ورودی ۶۰ ولت

مشخص است که خروجی، ورودی را دنبال کرده و سامانه عملکرد پایدار و مطلوبی دارد. عملکرد کنترل‌گر به ازای ورودی‌های دیگر نظیر ۶۵ و ۷۰ ولت نیز بررسی شد و رفتار مشابه مشاهده شد. با توجه به اینکه در بازه زمانی نمونه‌گیری، علاوه بر محاسبات کنترل‌گر، محاسبات مربوط به میانگین متحرک و ضرب در بهره تنظیم شده نیز صورت می‌گیرد و سرعت پردازش میکروکنترل‌گر نیز محدود است، دست‌یابی به بسامد کنترلی بالاتر از ۵۰۰ هرتز ممکن نیست. در واقع تمام محاسبات فوق باید تنها در ۲ میلی‌ثانیه صورت گیرد. دست‌یابی به سرعت‌های بالاتر نیازمند استفاده از پردازنده‌های قوی‌تر و گران‌تر است. در صورت استفاده از چنین میکروکنترل‌گری، عملکرد سامانه بهبود چشم‌گیری داشته و نوسانات کوچک مشاهده شده در شکل ۸ نیز از بین می‌رود.

۵. کالیبره کردن میکروسکوپ

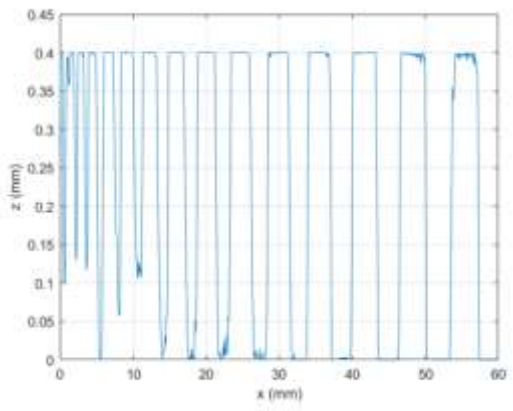
برای استفاده از مجموعه ساخته شده به عنوان یک میکروسکوپ که ابزار اندازه‌گیری محسوب می‌شود، مانند هر ابزار اندازه‌گیری دیگری نیاز به کالیبره کردن وجود دارد. هدف این بخش ایجاد یک تناظر یک به یک میان جریان عبوری از سیم‌پیچ و مقدار تغییر ارتفاع نمونه نسبت به سطح مرجع است. در قسمت قبل اشاره شد که در این میکروسکوپ با افزایش ارتفاع نمونه در زیر تیر، جریان عبوری سیم‌پیچ کاهش پیدا می‌کند و بالعکس. بنابراین، ایجاد چنین تناظری میان جریان سیم‌پیچ و ارتفاع نمونه منطقی به نظر می‌رسد. با توجه به لزوم وجود تعدادی نقطه با ارتفاع متفاوت به منظور کالیبره کردن میکروسکوپ، یک قطعه فیزیکی مطابق شکل ۹ ساخته شد.



شکل ۹. ابزار کالیبره کردن

این قطعه به علت استفاده شدن برای کالیبره کردن دستگاه، باید با دقت بالا ساخته شود. از این رو، به کمک یک پرینتر سه‌بعدی رزینی که دقت بالایی نسبت به سایر نمونه‌های پرینتر سه‌بعدی دارد، ساخته شده است. نظر به اینکه علاوه بر کالیبره شدن میکروسکوپ، رزولوشن کاری آن در صفحات افقی و عمودی باید تعیین شود، قطعه طراحی شده دارای ۴ ارتفاع مختلف (راستای ۲) و فواصل افقی از مقدار ۰/۱ میلی‌متر تا ۳ میلی‌متر (راستای ۱) با افزایش فاصله ۰/۵ میلی‌متری در هر گام، می‌باشد. ارتفاع

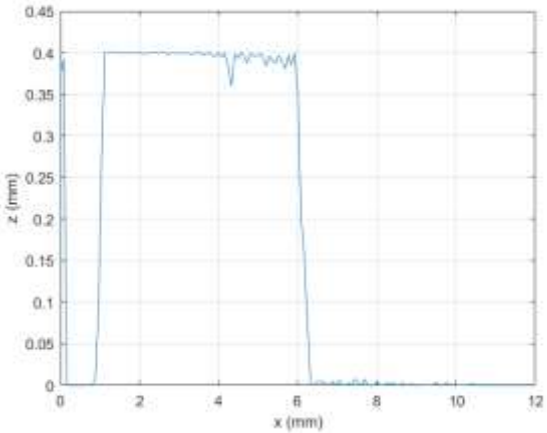
پله‌های راستای ۱ برابر ۰/۴ میلی‌متر است. مقادیر ارتفاع پله‌ها در راستای ۲ از ۰/۴ میلی‌متر تا ۰/۱ میلی‌متر (با گام ۰/۱ میلی‌متر) است. بنابراین، با مشخص بودن ابعاد قطعه فوق (طول ۶۵ و عرض ۱۰ میلی‌متر)، آن را در راستاهای ۱ و ۲ زیر میکروسکوپ حرکت داده و جریان عبوری از سیم‌پیچ اندازه‌گیری می‌شود. با حرکت در راستای ۱، جریان از مقدار ۰/۴ آمپر در دره به مقدار ۰/۲ آمپر در قله پیوسته در تغییر است. هنگام داده‌برداری، راستای ۱ در امتداد عرضی تیر و راستای ۲ در امتداد طولی آن است. از این رو، با استفاده از یک معادله خط مرتبه اول که مقادیر ۰/۴ و ۰/۲ آمپر توسط آن به ۰ و ۰/۴ میلی‌متر تبدیل می‌گردد، کالیبره کردن میکروسکوپ انجام می‌شود. معادله خط فوق به شکل $y = -2x + 0.8$ به دست می‌آید. در این رابطه ورودی جریان برحسب آمپر و خروجی ارتفاع نقطه مد نظر بر حسب میلی‌متر است. نمودار خروجی کالیبره شده میکروسکوپ در حرکت در راستای ۱ در شکل ۱۰ آورده شده است.



شکل ۱۰. نمودار سطح در راستای ۱

مطابق شکل ۱۰، میکروسکوپ در ترسیم نمودار پستی و بلندی سطح قطعه در راستای ۱ عملکرد صحیح و مورد انتظاری از خود نشان می‌دهد. تغییر فواصل میان دو قله پیاپی در راستای ۱ که مقداری فزاینده را نشان می‌دهد، کاملاً منطبق با توضیح ارائه شده در رابطه با ابعاد قطعه ساخته شده است. برای اطمینان از تکرارپذیری عملکرد میکروسکوپ و بررسی قابلیت اعتماد آن، داده‌برداری فوق چندین مرتبه به طرق مختلف تکرار شد. رفتار میکروسکوپ در این داده‌برداری‌ها نیز کاملاً متناسب با داده‌برداری قبلی و عملکرد آن مورد تایید است. با مبنا قرار دادن اولین نقطه تشخیص ارتفاع صفر (سومین دره)، رزولوشن تصویربرداری در صفحه افقی برابر ۱/۱ میلی‌متر تعیین می‌گردد. به عبارت دیگر، هیچ المانی با ابعاد افقی کمتر از ۱/۱ میلی‌متر توسط میکروسکوپ تشخیص داده نمی‌شود.

در نهایت برای تشخیص رزولوشن تصویربرداری در صفحه عمودی، قطعه در راستای ۲ زیر میکروسکوپ حرکت داده و نمودار مربوط به تغییرات سطح بررسی می‌شود.



شکل ۱۱. نمودار سطح در راستای ۲

با حرکت در راستای ۲ و تغییر ارتفاع از ۰/۴ به ۰/۳ میلی‌متر، رفتار نوسانی میکروسکوپ کاملاً مشهود است (به ثانیه چهارم به بعد دقت شود). اما این تغییر ارتفاع کافی برای تشخیص داده شدن توسط میکروسکوپ را ندارد. با ادامه حرکت روی قطعه و ورود به ارتفاع ۰/۲ میلی‌متر ناگهان میکروسکوپ تغییر ارتفاع را تشخیص داده و خروجی را کاهش می‌دهد. در نهایت با ورود به پله آخر، اندک نوسانات باقی‌مانده نیز از بین رفته و خروجی کاملاً

در پایین‌ترین حد خود قرار می‌گیرد (ثانیه هشتم به بعد). بنابر این میکروسکوپ تا قبل از ورود به ارتفاع ۰/۲ میلی‌متر تشخیص مناسبی از تغییر ارتفاع ندارد. به عبارت دیگر، رزولوشن تصویربرداری میکروسکوپ در صفحه عمودی، برابر ۰/۲ میلی‌متر یا ۲۰۰ میکرون می‌باشد.

۶. نتایج و بحث

در این پژوهش، به کمک برهم‌نهی یک سیم‌پیچ و آهنربا و با استفاده از یک میکروکنترل‌گر ساده به همراه یک مدار آنالوگ، بدون استفاده از حسگر خارجی، یک میکروسکوپ نیروی اتمی در ابعاد بزرگ طراحی و ساخته شد. با عبور جریان الکتریکی از سیم‌پیچ و به واسطه میدان مغناطیسی حاصل، بر آهنربا نیرو وارد می‌شود. این نیرو سبب ایجاد تشدید در تیر می‌گردد. از سویی با ارتعاش تیر و حرکت آهنربا در نزدیکی سیم‌پیچ، ولتاژ القایی متناسب با سرعت حرکت تیر ایجاد می‌شود. این ولتاژ، مبنای تشخیص ارتعاشات تیر (شامل اندازه دامنه و بسامد ارتعاش) می‌باشد. با انجام آزمون عملی روی یک قطعه از پیش ساخته شده با ابعاد معین، مشخص شد که رزولوشن تشخیص سطح در صفحه افقی ۱/۱ میلی‌متر و در صفحه عمودی ۰/۲ میلی‌متر است. با شناسایی عوامل محدودکننده رزولوشن، مسیرهای بهبود و ارتقای عملکرد میکروسکوپ به سادگی قابل تعیین می‌باشد. یکی از مهم‌ترین این عوامل، رزولوشن مبدل آنالوگ به دیجیتال مورد استفاده در سامانه است. در ساخت نمونه حاضر، از مبدل آنالوگ به دیجیتال ۱۰ بیتی با محدوده ولتاژ ۵ ولت استفاده شده است که رزولوشنی در حدود ۴ میلی‌ولت فراهم می‌کند. ازاین‌رو، استفاده از مبدلی با رزولوشن بالاتر می‌تواند به‌صورت مستقیم موجب افزایش رزولوشن کاری دستگاه و بهبود توانایی آن در تشخیص تغییرات کوچک سیگنال شود.

از سوی دیگر، یکی از مسیرهای مهم برای ارتقای عملکرد میکروسکوپ، افزایش بسامد کنترلی و استفاده از مود بسامد است. در این حالت، افزایش سرعت عملکرد سامانه کنترلی امکان نمونه‌برداری و واکنش سریع‌تر به تغییرات سطح را فراهم می‌کند. در نتیجه، این روش می‌تواند موجب بهبود عملکرد دستگاه در حین پیمایش شود. در مود بسامد، لازم است علاوه بر کنترل اندازه دامنه نوسانات، تغییرات ارتفاع سطح نیز به‌صورت هم‌زمان و مستقل تشخیص داده شود. بنابراین، افزایش سرعت پردازش و فراهم‌کردن امکان اجرای هم‌زمان این دو فرآیند کنترلی، از الزامات اصلی برای پیاده‌سازی این روش محسوب می‌شود.

استفاده از مود بسامد می‌تواند علاوه بر افزایش سرعت پیمایش، امکان دست‌یابی به دقت و پایداری بیشتر در اندازه‌گیری ارتفاع سطح را فراهم کند؛ زیرا در این روش، تغییرات سطح از طریق تغییرات بسامد نوسانات ردیابی می‌شود و کنترل دامنه نیز به‌صورت مستقل صورت می‌پذیرد. ازاین‌رو، توسعه سامانه کنترلی با قابلیت پردازش سریع و اجرای هم‌زمان حلقه‌های کنترلی مربوط به دامنه و ارتفاع، یکی از مهم‌ترین مسیرهای توسعه این میکروسکوپ در پژوهش‌های آتی خواهد بود.

در مجموع، افزایش رزولوشن مبدل و در نتیجه کاهش حد تفکیک سیگنال، در کنار افزایش بسامد کنترلی و پیاده‌سازی مود تنظیم بسامد، دو مسیر اصلی برای ارتقای رزولوشن و عملکرد میکروسکوپ به شمار می‌آید. این اصلاحات می‌توانند زمینه را برای دست‌یابی به تصویربرداری سریع‌تر و دقیق‌تر به همراه توانایی تشخیص تغییرات کوچک‌تر در توپوگرافی سطح فراهم کنند.

۷. منابع

[1] J. R. Meyer-Arendt, "Optical Instrumentation for the Biologist: Microscopy," *Applied Optics,* pp. 1-9, 1965.

[2] S. Weisenburger and V. Sandoghdar, "Light Microscopy: An ongoing contemporary revolution," *physics.optics,* pp. 1-37, 2015.

[3] G. Binnig and H. Rohrer, "Scanning tunneling microscopy—from birth to adolescence," *Reviews of Modern Physics,* vol. 59, pp. 615-629, 1987.

[4] G. Binnig, C. F. Quate and C. Gerber, "Atomic Force Microscope," *Physical Review Letters,* vol. 56, pp. 930-934, 1986.

[5] D. I. K. K. V. E. Q. Zhong, "Fractured polymer/ silica fiber surface studied," *surface science letters,* vol. 290, pp. 688-692, 1993.

[6] J. I. Otamendi, "Fabrication and Characterization of Multilayered Assemblies based on Polyelectrolytes and Hybrid Systems with Carbon Nanomaterials for Applications in Nanofiltration and as Smart Surfaces," Donostia-San Sebastián, 2016.

[7] R. P. Ricardo Garcia, "Dynamic atomic force microscopy methods," *surface science reports,* vol. 47, pp. 197- 301, 2002.

[8] J. M. R. T. Arvind Raman, "Cantilever dynamics in atomic force microscopy," *nanotoday,* vol. 3, pp. 20-27, 2008.

[9] M. Mahdavi, H. M. Nasrabadi, M. Soleymaniha and S. O. R. Moheimani, "Modal Actuation and Sensing With an Active AFM Cantilever," *IEEE SENSORS JOURNAL,* vol. 21, pp. 8950- 8959, 2021.

[10] R. Millan-Solsona, S. R. Brown, L. Zhang and S. S. Madugula, "Analysis of biofilm assembly by large area automated AFM," *biofilms and microbiomes,* pp. 1-11, 2025.

[11] D. Amin-Shahidi and D. Trumper, "Macro-scale atomic force microscope: An experimental platform for teaching precision mechatronics," *Mechatronics,* pp. 234-242, 2015.

[12] P. D. Cha and J. I. Molinder, Fundamentals of Signals and Systems, Cambridge University Press, 2006.

[13] S. S. Rao, Vibration of Continuous Systems, John Wiley & Sons, Inc., 2019.

پی‌نوشت

[1] Galileo
[2] Scanning Tunnel Microscopy, STM
[3] Atomic Force Microscope, AFM

[4] Van der Waals

[5] Massachusetts Institute of Technology, MIT

[6] Hall effect

[7] Arduino UNO

[8] Polylactic Acid, PLA

[9] Neodymium

[10] Maxwell

[11] Back-emf

[12] Direct Current, DC

[13] Moving Average

[14] Proportional Integral Derivative, PID

[15]Tustin

[16]Z Inverse Transform