

تحلیل مدل تماس هرتز برای ارزیابی خواص مکانیکی پلیمرها با استفاده از روش اجزای محدود

لایسوییداس استریسکا 1,2، روکاس آستراوسکاس 3، نیکولایوس کوزولیناس 3، داینیوس اودریس 2، سوناتا تولویسین 20، اوگنیوس ماسراوسکاس 2، اینگا مورکونایت 1,2، و آروناس رامانایسیوس 1,4*

¹ دپارتمان نانوفناوری، مرکز علوم و فناوری فیزیکی، سولتکیو ال. 3، 10257 ویلنیوس، لیتوانی؛ laisvidas.striska@ftmc.lt
² دانشکده مهندسی برق، دانشگاه فنی ویلنیوس گدیمیناس، پلیتینس 25، 10105، ویلنیوس، لیتوانی؛ sonata.tolvaisiene@vilniustech.lt (S.T.)؛ dainius.udris@vilniustech.lt (D.U.)؛ eugenijus.macerauskas@vilniustech.lt (E.M.)
³ دانشکده ریاضی و انفورماتیک، دانشگاه ویلنیوس، 01513 ویلنیوس، لیتوانی؛ rokastrauskas@mif.vu.lt (R.A.)؛ nikolajus.kozulinas@mif.vu.lt (N.K.)
⁴ + دپارتمان شیمی فیزیک، دانشگاه ویلنیوس، ناگاردوکو، خیابان ناگاردوکو، پلاک 24، 03225، ویلنیوس، لیتوانی. مکاتبات: arunas.ramanavicius@chf.vu.lt (A.R.)؛ inga.morkvenaite-vilkonciene@vilniustech.lt (L.M.)

چکیده

میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) به طور گسترده برای تعیین کمیت خواص مکانیکی، معمولاً مدول یانگ، با برازش داده‌های نیرو-فرورفتگی با مدل‌های مختلف تماس ریاضی استفاده می‌شود. با این حال، نتایج در آزمایشگاه‌های مختلف اغلب متفاوت است و علل آن حل نشده باقی مانده است. در اینجا، ما روش‌شناسی تعریف خواص مکانیکی در فرورفتگی AFM را بررسی می‌کنیم و محدودیت‌های کلیدی مدل هرتز، مدل استاندارد برای تعیین خواص مکانیکی، را شناسایی می‌کنیم، به ویژه اینکه شعاع تماس به طور مستقیم تعیین نمی‌شود، که دقت مدول یانگ تخمین زده شده را محدود می‌کند. ما فرض می‌کنیم که این استنتاج به طور سیستماتیک تماس واقعی نوک-نمونه را بیش از حد تخمین می‌زند، که باعث افزایش سطح تماس و در نتیجه کمتر از حد تخمین زدن مدول یانگ می‌شود. این سوگیری تحت شرایط فرورفتگی بزرگ، که اغلب در مطالعات مواد نرم استفاده می‌شود، تقویت می‌شود. برای جداسازی و روشن کردن موضوع، ما بر روی یک پلیمر شناخته شده، پلی وینیل کلراید (PVC)، تمرکز می‌کنیم و از آن به عنوان یک بستر آزمایشی کنترل شده برای بیش تخمین شعاع تماس استفاده می‌کنیم تحلیل ما بر روی شعاع تماس و استخراج مدول یانگ مبتنی بر هرتز متمرکز است. ما شعاع تماس و مدول یانگ را با استفاده از AFM با دو پروب مختلف تعیین کردیم: یک کره با شعاع 20 نانومتر (SPHERE20) و یک کره با شعاع 2 میکرومتر (SPHERE2000). نتایج با داده‌های ماکروسکوپی به دست آمده با استفاده از اندازه‌گیری استاندارد (ISO 527-1:2019) مدول یانگ مقایسه شدند. تماس با استفاده از تحلیل المان محدود (FEA) مدل سازی شد. وابستگی شعاع تماس به فرورفتگی با مدل هرتز مقایسه شد. نتایج حاصل از FEA با مقادیر شعاع تماس اصلاح شده مطابقت داشت و این مقدار 15.46% (SPHERE20) و 57.9% (SPHERE2000) کوچکتر از مقادیر محاسبه شده توسط مدل هرتز است.

کلمات کلیدی: میکروسکوپ نیروی اتمی؛ مدول الاستیک؛ مدول یانگ؛ شعاع تماس؛ تحلیل المان محدود؛ پلیمر

1. مقدمه

میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) به طور گسترده برای تعیین کمیت خواص مکانیکی مواد از منحنی‌های نیرو-فرورفتگی با استفاده از مدل‌های تماسی، که معمولاً فرمول‌های هرتزی هستند [1-3]، استفاده می‌شود. مدل هرتز امکان یافتن مستقیم مدول الاستیک از منحنی‌های نیرو-فاصله را فراهم می‌کند. نرم‌افزارهای تجاری AFM معمولاً با هرتز عرضه می‌شوند.



ویراستار علمی: آندره سورنتینو

دریافت: 22 اکتبر 2025

اصلاح شده: 7 نوامبر 2025

پذیرفته شده: 8 نوامبر 2025

منتشر شده: 13 نوامبر 2025

منبع: استریسکا، ل.؛ آستراوسکاس،

ر.؛ کوزولیناس، ن.؛ اودریس، د.؛

تولویسین، س.؛ ماسراوسکاس، آ.؛

مورکونایت، آ.؛ رامانایسیوس، آ.

تحلیل مدل تماس هرتز برای ارزیابی

خواص مکانیکی پلیمرها با

استفاده از روش اجزای محدود. پلیمرها

۲۰۲۵، ۱۷، ۳۰۱۸.

<https://doi.org/10.3390/polym17223018>

حق چاپ: © ۲۰۲۵ توسط نویسندگان.

دارنده مجوز MDPI، بازل، سوئیس. این

مقاله یک مقاله با دسترسی آزاد است که

تحت شرایط و ضوابط مجوز Creative

Commons Attribution (CC BY)

(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

توزیع شده

است.

روش پیش فرض برای استخراج مدول [4]. اگرچه مدول هرتز به عنوان ابزار تحلیلی استاندارد برای فرورفتگی AFM همچنان پابرجاست، اما فرضیات اصلی آن اغلب برای مواد پلیمری یا نرم، از جمله سلول های زنده، با شکست مواجه می شود. به طور خاص، این مدول نمی تواند مستقیماً شعاع تماس واقعی را تعیین کند، که منجر به تخمین کمتر از حد مدول یانگ می شود [5,6]. علاوه بر این، نه نقطه تماس دقیق نوک-نمونه و نه عمق فرورفتگی واقعی به طور مستقیم در مدول هرتز [6] مشاهده نمی شوند. هر دو از حرکت پیرو و انحراف کانتیلور بازسازی شده اند و فقط روی سطوح اسمی سخت و صاف به خوبی تعریف شده اند [5]. برای نمونه های مکانیکی نرم (مدول یانگ پایین) یا در فرورفتگی های بزرگ، رابطه انحراف-جابجایی پیروالکترونیک اندازه گیری شده غیرخطی می شود، بنابراین در نظر گرفتن آن به عنوان بایاس خطی نیرو و فرورفتگی، برازش های مدول یانگ را به خطر می اندازد [7,8]. پیچیدگی های اضافی، مانند سطح تماس وابسته به بار، زبری سطح، چسبندگی و ضخامت محدود، تخمین مدول یانگ را پیچیده تر می کند [9-12]. اعمال یک مدول تماس ایده آل و واحد در هندسه های نوک ناهمگن (کروی، مخروطی، انتهای تخت) و مدول های چسبندگی (به عنوان مثال، JKR/Maugis) نمی تواند مدول یانگ را ارزیابی کند [13].

این مشکلات منجر به تفاوت در مدول یانگ برای مواد یکسان بین آزمایشگاه ها می شود [5]. این امر پیامدهای مهمی برای قابلیت اطمینان خواص مکانیکی نانومقیاس تعریف شده در بین مواد دارد [14]. تحلیل المان محدود ابزاری ارزشمند برای پرداختن به این موضوع است، زیرا امکان تجسم و تعیین کمیت هندسه تماس واقعی در طول فرورفتگی را فراهم می کند. این امر امکان توصیف دقیق تری از آنچه در نقطه تماس در طول فرآیند فرورفتگی اتفاق می افتد را فراهم می کند

شعاع تماس یک عامل اصلی و اغلب نادیده گرفته شده است که باعث عدم قطعیت در تعیین مدول یانگ می شود. ما فرض می کنیم که شعاع تماس واقعی، به ویژه در فرورفتگی های بزرگ که معمولاً در مطالعات ماده نرم استفاده می شوند، بیش از حد تخمین زده می شود، جایی که سطح تماس ظاهری بالاتر از حد انتظار است. بنابراین، مدول یانگ واقعی نیز کمتر از حد تخمین زده می شود. در مدل هرتز، شعاع تماس یک کمیت اندازه گیری شده مستقیم نیست [6]؛ در عوض، از عمق فرورفتگی و هندسه فرضی نوک، به صورت معکوس محاسبه می شود. علاوه بر این، سطح تماس با فرورفتگی افزایش می یابد [15,16]. بنابراین، مشخص نیست که چه بخشی از نتایج به هندسه نوک و چه بخشی به خواص نمونه بستگی دارد

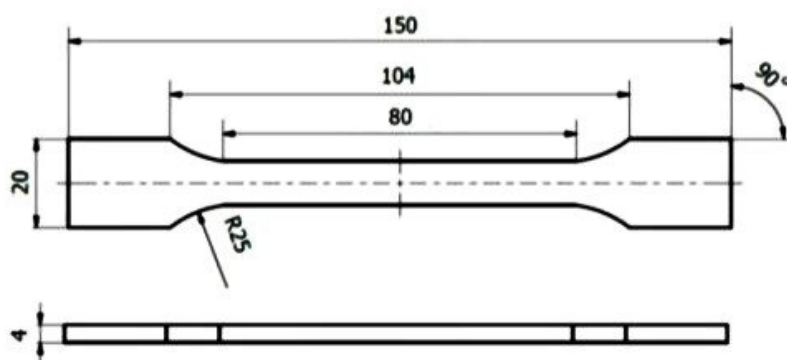
آزمایش های پلیمری به عنوان مدلی برای مواد بیولوژیکی نرم، که در آن ها اغلب فرورفتگی های بزرگ ضروری هستند، مفید هستند [17,18]. کار با پلیمرها آسان است، مدول یانگ آن ها به خوبی مشخص شده است و اندازه گیری های تکرارپذیری ارائه می دهند که امکان مقایسه های قابل اعتمادی را در بین آزمایش ها فراهم می کند [19,20]. آن ها همچنین به ما اجازه دادند تا یک محدودیت کلیدی هرتز را جدا کنیم: نیاز به تعیین شعاع تماس واقعی به جای تکیه بر تخمین های هندسی. با روشن کردن این رفتار در نمونه هایی با خواص شناخته شده، می توانیم تأثیر آن را بر بافت های نرم پیش بینی کنیم و با تحلیل المان محدود، بررسی های عمیق تری را ایجاد کنیم. سپس می توانیم درک بهبود یافته را به تعیین خواص مکانیکی در مواد بیولوژیکی منتقل کنیم

هدف مقاله حاضر نشان دادن محدودیت های مدل هرتز برای نانوفرورفتگی AFM ناشی از شعاع تماس غیرمستقیم (و متورم) است. ما منحصراً بر مدل هرتز تمرکز کردیم و آن را به عنوان معیار پیش فرض جامعه در نظر گرفتیم و در عین حال بررسی کردیم که چگونه فرضیات شعاع تماس بر تخمین های مدول تأثیر می گذارند. علاوه بر این، بررسی می کنیم که چگونه فرورفتگی AFM خواص مکانیکی را تعیین می کند و محدودیت هایی را که به طور خاص در چارچوب هرتز ایجاد می شوند، شناسایی می کنیم. ما شعاع تماس و مدول یانگ را با استفاده از AFM با دو پروب مختلف تعیین کردیم: یک کره با شعاع 20 نانومتر (SPHERE20) و یک کره با شعاع 2 میکرومتر (SPHERE2000). نتایج با داده های ماکروسکوپی به دست آمده با استفاده از اندازه گیری استاندارد (ISO 527-1:2019) [21] مدول یانگ مقایسه شدند. تجزیه و تحلیل المان محدود با استفاده از نرم افزار COMSOL Multiphysics 6.3 برای تجزیه و تحلیل تماس مکانیکی بین یک فرورونده کروی صلب و یک سطح پلیمری در طول فرورفتگی AFM انجام شد.

۲. مواد و روش‌ها

۲.۱. مواد و تجهیزات

سیستم تست کشش-فشار با کنترل کامپیوتری، 1-Mecmesin MultiTest 2.5 (شرکت Mecmesin Limited، ساسکس غربی، انگلستان)، با خطای اندازه‌گیری حسگر بار ۰.۱٪، برای اندازه‌گیری‌های تنش و کرنش استفاده شد. دستگاه آزمایش با استفاده از نرم‌افزار Emperor Force (شرکت Mecmesin Ltd، هورشام، انگلستان) کنترل شد. ورق‌های پلی‌وینیل کلراید (PVC) از هلیوپولیس (ویلنیوس، لیتوانی) تهیه شدند. نمونه‌ها از گریدهای اولیه و بدون پرکننده و برای مصارف عمومی و بدون ترکیب اضافی بودند. ورق‌ها بدون پوشش و بدون بارگذاری یا تغییر شکل قبلی بودند تا از تغییر شکل در خواص مکانیکی اندازه‌گیری شده جلوگیری شود. ورق‌ها حداقل 24 ساعت قبل از آزمایش در دمای 23 درجه سانتیگراد قرار داده شدند. نمونه‌ها طبق هندسه نشان داده شده در شکل 1 طبق استاندارد ISO 527-1:2019 تهیه شدند.



شکل 1. ابعاد نمونه و کاربرد روش استاندارد برای ارزیابی مدول الاستیک E.

مدول الاستیک از منحنی‌های تنش-کرنش اولیه (شکل 1) تعیین و با استفاده از [22]

برازش داده شد:

$$\sigma = E_a \cdot \epsilon_n \quad (1)$$

که در آن E_a مدول الاستیسیته تقریبی، و تغییر شکل نسبی و n ضریبی است که نوع منحنی را نشان می‌دهد ($n = 1$ مربوط به یک منحنی خطی سازگار با قانون هوک، یعنی حد الاستیک شرطی برای پلیمرها است). نتایج نمونه‌ها به طور خاص در این ناحیه تقریب زده شد.

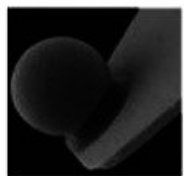
ما از BioScope II AFM و یک میکروسکوپ نوری، که هر دو توسط شرکت Veeco Instruments Ltd. (سانتا باربارا، کالیفرنیا، ایالات متحده آمریکا) توسعه یافته‌اند، برای اندازه‌گیری منحنی‌های نیرو-فرورفتگی استفاده کردیم. کالیبراسیون ثابت فنر کانتیلورهای AFM با استفاده از روش تنظیم حرارتی با سیستم Bruker BioScope II/NanoScope V تحت شرایط محیط (هوا) انجام شد [23].

2.2. تعیین مدول یانگ و شعاع تماس

منحنی‌های نیرو-فرورفتگی توسط AFM با استفاده از دو پروب با هندسه متمایز اندازه‌گیری شدند (جدول 1). هر کانتی لیور دارای شعاع نوک اسمی، حداقل و حداکثر است که به طور قابل توجهی بر شعاع تماس و خواص مکانیکی نهایی نمونه تأثیر می‌گذارد. در این مقاله، ما فقط از شعاع‌های نوک اسمی استفاده کردیم. هر اندازه‌گیری حداقل 25 بار انجام شد. مقادیر مرجع مدول یانگ با استفاده از روش استاندارد (بخش 2.1) تعیین شدند. مقادیر AFM/هرتز مدول یانگ با برازش معادله (2) به وابستگی‌های نیرو-فرورفتگی اندازه‌گیری شده، با مقادیر شعاع نوک اسمی (جدول 1) محاسبه شدند.



SPHERE20: HDCT (زیست‌کره B20-NCH). هندسه: کروی. ابعاد: $T = 4$ میکرومتر، $L = 125$ میکرومتر، $W = 20$ میکرومتر، $f_0 = 230$ کیلوهرتز. ثابت فنر: 40 نیوتن بر متر. اندازه‌گیری شده: 52.5 نیوتن بر متر. شعاع نوک: 20 ± 5 نانومتر. شعاع اسمی نوک: 20 نانومتر. نانواپزارها (مونیک، آلمان).



SPHERE2000: CP-FM-SiO-A-5. هندسه: کروی. ابعاد: $T = 3 \pm 1$ میکرومتر، $L = 225 \pm 10$ میکرومتر، $W = 28 \pm 7.5$ میکرومتر. ثابت فنر: $9.5-0.5$ نیوتن بر متر. اندازه‌گیری شده: 4.18 نیوتن بر متر. $f_0 = 45-115$ کیلوهرتز. شعاع نوک: 2 میکرومتر $\pm 5\%$. شعاع اسمی نوک: 2 میکرومتر. sQube (صوفیه، بلغارستان).

شعاع تماس اصلاح‌شده با استفاده از شعاع نوک به‌دست‌آمده از برازش مدل هرتز (معادله (3)) با مقادیر مرجع مدول یانگ محاسبه شد. ما از مدلی که خود تولیدکنندگان AFM به عنوان مدل استاندارد برای تحلیل منحنی نیرو-فاصله AFM ارائه می‌دهند، پیروی کردیم [4].

مقادیر AFM/هرتز شعاع تماس با استفاده از شعاع اسمی نوک محاسبه شدند (جدول 1). مقادیر فرورفتگی برای مقادیر اصلاح‌شده و AFM/هرتز از داده‌های تجربی گرفته شدند.

مدول یانگ E با برازش مدل هرتز [24] محاسبه شد:

$$F = \frac{4}{3} \frac{E}{(1 - \nu^2)} \sqrt{R} \delta^{3/2} \quad (2)$$

که در آن F نیروی فرورفتگی، E مدول یانگ، ν نسبت پواسون، R شعاع نوک و δ فرورفتگی است.

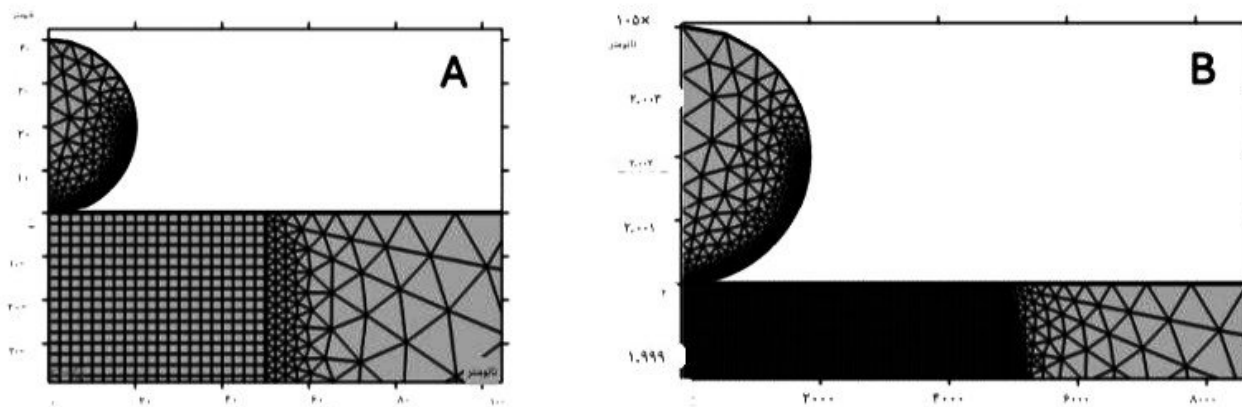
شعاع تماس محاسبه شد [25]:

$$a = \sqrt{\delta \cdot R} \quad (3)$$

2.3. مدل‌سازی و شبیه‌سازی

مدل‌های المان محدود برای تحلیل فرورفتگی یک نوک کروی در یک ورق PVC در طول آزمایش‌های AFM توسعه داده شدند. از مدل متقارن محوری ثابت در نرم‌افزار COMSOL Multiphysics استفاده شد (شکل 1). فرورونده به عنوان یک ماده صلب متشکل از نیتريد سیلیکون با جابجایی از پیش تعیین‌شده در امتداد محور Z مدل‌سازی شد. پلیمر به عنوان یک ماده فوق الاستیک با استفاده از مدل سنت و نانت-کیرشهوف با مدول یانگ 1.15 گیگاپاسکال و نسبت پواسون 0.32 معرفی شد. ضخامت ورق 2 میلی‌متر و عرض آن به اندازه کافی بزرگ است. برهمکنش بین نوک و سطح پلیمر با روش تماس لاگرانژی افزوده مدل‌سازی شد. تماس بدون اصطکاک فرض شد. یک قید غلتکی به مرز پایینی اعمال شد تا جابجایی در جهت Z صفر باشد.

مدل با استفاده از المان‌های مثلثی برای نوک، شبکه‌بندی شد. دو شبکه مختلف برای ورق پلیمری اعمال شد: المان‌های چهارضلعی در دامنه زیر فرورونده و المان‌های مثلثی برای دامنه باقیمانده پلیمر استفاده شدند. محاسبات نشان داد که چنین شبکه متصلی، همگرایی مدل را بهبود می‌بخشد. چگالی شبکه در نزدیکی ناحیه تماس با مشخص کردن توزیع متراکم‌تر نقاط شبکه افزایش یافت (شکل 2).



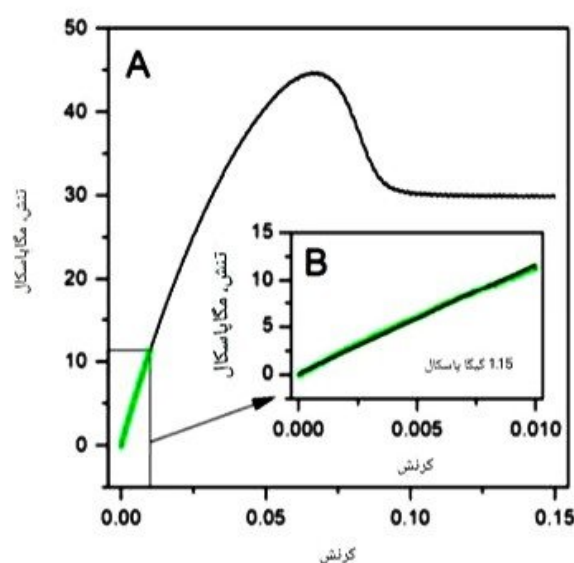
شکل ۲. مدل FEA: توزیع مش. (الف) SPHERE20، (ب) SPHERE2000

شبیه‌سازی‌ها پیش‌بینی‌هایی از شعاع تماس، میدان تغییر شکل و رفتار نیرو-فرورفتگی ارائه دادند که امکان مقایسه مستقیم با پیش‌بینی‌های تحلیلی هرتز و داده‌های تجربی AFM را فراهم می‌کرد. مدل المان محدود با استفاده از داده‌های تجربی فرورفتگی AFM برای هر دو پروپ SPHERE20 و SPHERE2000 بیشتر ارزیابی شد. اعتبارسنجی با مقایسه مستقیم منحنی‌های نیرو-فرورفتگی شبیه‌سازی شده و تجربی تحت شرایط هندسی و مادی یکسان انجام شد. عمق فرورفتگی و شعاع نوک یکسان در شبیه‌سازی‌ها مانند اندازه‌گیری‌های AFM مربوطه استفاده شد.

3. نتایج

3.1. تعیین مدول یانگ نمونه‌ها با روش استاندارد

روابط تنش-کرنش PVC با استفاده از آزمایش کشش استاندارد طبق ISO 527-1:2019 بدست آمد. مدول یانگ برای PVC از شیب منحنی تنش-کرنش، همانطور که در معادله (1) تعریف شده است، تعیین شد. مقدار مرجع تقریبی برای 1.15 گیگا پاسکال PVC، شکل 3A منحنی تنش-کرنش را نشان می‌دهد و شکل 3B بر روی بخش خطی اولیه مورد استفاده برای استخراج مدول یانگ تمرکز می‌کند. ما فقط ناحیه الاستیک (بخش جعبه‌ای در شکل 3A) را در نظر می‌گیریم زیرا در اینجا تنش متناسب با کرنش است و روش کششی ISO، E را تعریف می‌کند. فراتر از این ناحیه، رفتار این پلیمرها برای تعیین مدول مورد تجزیه و تحلیل قرار نگرفت [22].



شکل 3. وابستگی‌های تنش-کرنش. (الف) وابستگی کرنش-تنش PVC اندازه‌گیری شده با روش استاندارد (ISO 527-1:2019). (ب) داده‌های برازش شده از قطعه A در ناحیه تغییر شکل الاستیک با استفاده از معادله (1).

ماندن در محدوده الاستیک، اثرات غیرخطی را به حداقل می‌رساند و از مصنوعات ناشی از پلاستیسیته جلوگیری می‌کند و تضمین می‌کند که شیب واقعاً منعکس کننده مدول یانگ است. این مدول‌های کششی به سبک ISO به عنوان مقادیر مرجع مورد تایید ما برای مقایسه با مدول دریافتی از مدل هرتز (جدول ۲ و ۳) عمل می‌کنند.

جدول ۲. مدول یانگ، AFM/هرتز در مقابل مقدار مرجع.

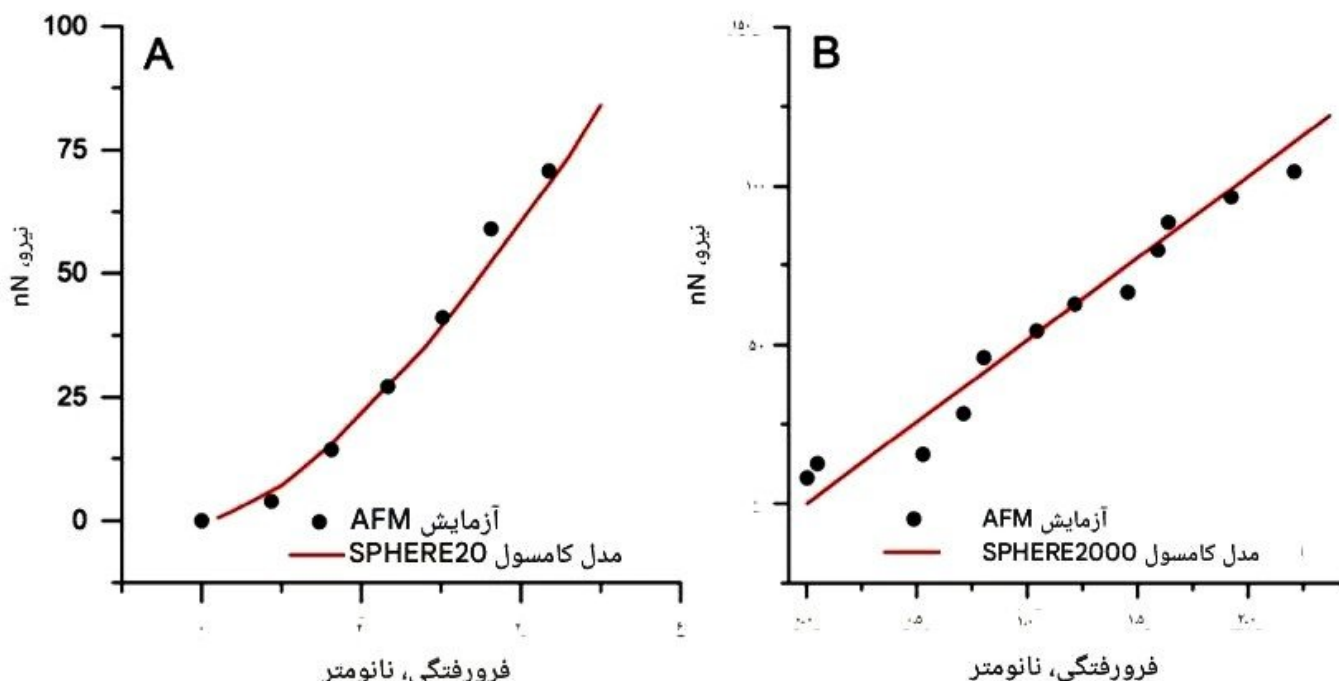
نوک	مرجع ISO [گیگاپاسکال]	AFM/هرتز [گیگاپاسکال]	A (گیگاپاسکال)	Δ (%)	با شعاع تماس اصلاح شده (گیگاپاسکال)	A با شعاع تماس اصلاح شده (گیگاپاسکال)
SPHERE20	PVC (1.15)	1.00	0.15	13.00	1.15	0.00
SPHERE2000		0.75	0.40	25.00	1.15	0.00

جدول 3. شعاع تماس در بالاترین فرورفتگی (شکل 4): اصلاح شده در مقابل AFM/هرتز.

نوک	اصلاح شده، نانومتر	AFM/هرتز، نانومتر	Δa	a تخمین بیش از حد [%]
SPHERE20	7.05	8.14	1.09	15.46
SPHERE2000	28.3	44.7	16.4	57.9

3.2. اعتبارسنجی مدل اجزای محدود

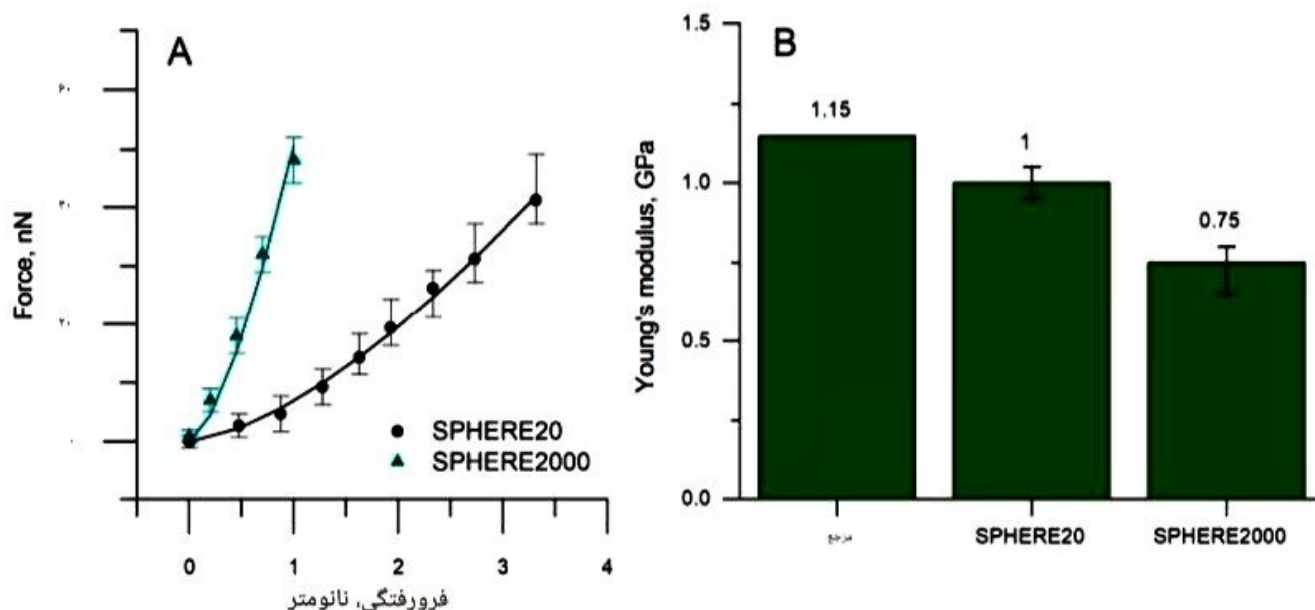
شکل ۴ مقایسه‌ای مستقیم بین شبیه‌سازی‌های المان محدود و منحنی‌های فرورفتگی تجربی AFM به دست آمده برای پروب‌های SPHERE20 و SPHERE2000 ارائه می‌دهد. منحنی‌های عددی و تجربی تقریباً در کل محدوده فرورفتگی همپوشانی دارند، که نشان می‌دهد مدل به طور دقیق تماس با شعاع کوچک را نشان می‌دهد. حداکثر اختلاف بار در عمق‌های فرورفتگی قابل مقایسه تقریباً از ۵٪ تجاوز نمی‌کند، که در محدوده عدم قطعیت تجربی قرار می‌گیرد. توافق خوب بین منحنی‌های شبیه‌سازی شده و تجربی تأیید کرد که پیکربندی المان محدود به طور دقیق مکانیک تماس سیستم را نشان می‌دهد و مبنای قابل اعتمادی برای تعیین شعاع تماس فراهم می‌کند.



شکل ۴. مقایسه مدل FEA با داده‌های تجربی. (الف). SPHERE20؛ (ب). SPHERE2000.

۳.۳. تعیین مدول یانگ نمونه‌ها با مدل هرتز

شکل ۵ منحنی‌های نیرو-فرورفتگی به‌دست‌آمده برای PVC با دو کانتیلور و مدول یانگ مختلف را نشان می‌دهد. در اینجا مقادیر مدول مرجع PVC (۱.۱۵ گیگاپاسکال) را با مقادیر استخراج‌شده از منحنی‌های نیرو-فرورفتگی AFM با استفاده از مدل هرتز برای دو پروب کانتیلور: SPHERE20 و SPHERE2000 (شکل ۵A) مقایسه می‌کنیم. مدول AFM/هرتز مرجع را حدود ۱۳٪ برای SPHERE20 (۱.۰۰ گیگاپاسکال) و حدود ۳۵٪ برای SPHERE2000 (۰.۷۵ گیگاپاسکال) کمتر از مقدار مرجع تخمین می‌زنند (جدول ۲). بنابراین، در دو پیکربندی، بایاس بین ۱۲ تا ۲۵ درصد متغیر است و بهترین توافق برای SPHERE20 روی PVC است. همانطور که قبلاً بحث شد، پروب با شعاع بزرگتر (SPHERE2000) شعاع تماس را بیش از حد تخمین می‌زند، که منجر به مدول یانگ پایین حاصل از برازش مدل هرتز می‌شود. شعاع تماس کره کوچک به فرضیات هرتز نزدیک‌تر می‌ماند و بهتر برازش می‌شود.



شکل ۵. (الف) منحنی‌های نیرو در مقابل فرورفتگی و (ب) مقادیر مدول یانگ در تیرک‌های مختلف

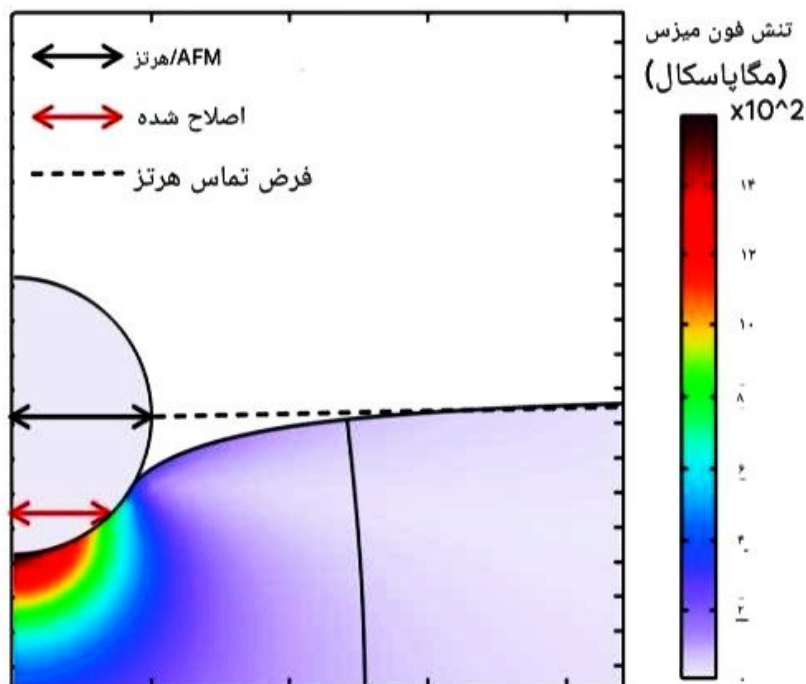
هر دو پروب به حداکثر نیروی قابل مقایسه‌ای می‌رسند، اما برای هر نیروی معین، SPHERE2000 به فرورفتگی بسیار کمتری نسبت به SPHERE20 نیاز دارد (شکل 5A). با وجود این رفتار منطقی، مدول‌های برازش‌شده بین پروب‌ها قابل مقایسه نیستند. از جنس PVC و شرایط آزمایش یکسان، مدل هرتز منجر به اختلاف حدود ۲۵ درصدی در مدول یانگ می‌شود و هیچ‌کدام از این مقادیر به مرجع کششی ISO یعنی ۱.۱۵ گیگاپاسکال نمی‌رسند (شکل 5B).

اگرچه ما یک پلیمر کاملاً مشخص (نه مواد نرم، مانند سلول‌های زنده) را آزمایش کردیم، اما همچنان انحرافات زیادی در مقادیر مدول یانگ بین پروب‌ها مشاهده کردیم. در اصل، مدل هرتز باید پس از استفاده از شعاع نوک صحیح R در محاسبات، مدول یکسانی را برای همان ماده بازگرداند؛ در عمل، این کافی نیست. تخمین بیش از حد ناحیه تماس واقعی و تحت فشار وابسته به پروب، مدول را مختص پروب می‌کند و هر دو تخمین از مدول یانگ مرجع کمتر هستند. این با گزارش‌های اختلاف در مدول یانگ بین آزمایشگاه‌ها، به ویژه برای بافت‌های بیولوژیکی و سلول‌های زنده، همسو است و بر نیاز به تعیین یا اصلاح ناحیه تماس واقعی هنگام گزارش مدول‌های مشتق شده از AFM تأکید می‌کند.

مقدار مدول یانگ، با استفاده از شعاع تماس اصلاح‌شده (جدول 2)، با برازش مدل هرتز به دست آمد. ما شعاع تماس را تنظیم کردیم تا مدول یانگ برابر با مقدار مرجع شود. بنابراین، A پس از اصلاح 0 است

مقدار A مشاهده شده نشان می‌دهد که وقتی از هندسه اسمی نوک برای برازش با مدل هرتز استفاده می‌شود، شعاع تماس بیش از حد تخمین زده می‌شود، زیرا مدل هرتز نمی‌تواند مستقیماً شعاع تماس را تعیین کند. بخشی از فرورفتگی اندازه‌گیری شده ناشی از تغییر شکل اطراف و بدون فشار است.

ناحیه خارج از محل تماس واقعی (شکل ۶). در نتیجه، شعاع تماس واقعی کوچکتر از تخمین مدل هرتز است که شعاع تماس را بالا می‌برد. این شعاع تماس متورم منجر به مدول برازش شده کمتری نسبت به مقدار مرجع می‌شود.



شکل ۶. تجسم شعاع تماس: فرض هرتز در مقابل FEA

شکل ۶ تحلیل المان محدود یک فروورنده کروی روی یک نمونه PVC را نشان می‌دهد. ناحیه تماس، ناحیه پر تنش در سطح مشترک است. خط چین مرکز تماس فرضی هرتز را نشان می‌دهد، در حالی که فلش‌های سیاه شعاع استنباطی AFM/هرتز را نشان می‌دهند و فلش قرمز شعاع اصلاح شده (FEA) را نشان می‌دهد. ناحیه FEA مشاهده شده کوچکتر از تخمین هرتز/هندسی است که نشان‌دهنده یک تخمین بیش از حد سیستماتیک از شعاع تماس است. علاوه بر این، FEA یک ناحیه تغییر شکل بدون فشار اطراف را نشان داد که در مدل هرتز ارزیابی نمی‌شود. شعاع تماس متورم منجر به مدول برازش کمتر از منحنی‌های تجربی نیرو-فرو رفتگی می‌شود. در مدل هرتز، که برای محاسبه مدول پانگ از منحنی‌های نیرو-فرو رفتگی اعمال می‌شود، شعاع تماس مشخص نیست و فقط شعاع نوک ارزیابی می‌شود (معادله (2)).

3.4. شعاع تماس تعیین شده توسط مدل هرتز

شعاع‌های تماس با استفاده از معادله (3) و با استفاده از مقادیر مدول پانگ ارائه شده در جدول 2 محاسبه شدند. حساسیت به عمق فرو رفتگی و هندسه نوک مستقیماً از مکانیک تماس پیروی می‌کند: فرو رفتگی‌های کروی با شعاع بزرگ باعث تغییر شکل سطح بدون فشار وسیع‌تری می‌شوند. در عین حال، مدل هرتز به طور مؤثر به ناحیه تماس اسمی نسبت داده می‌شود و در نتیجه برازش را بایاس می‌کند. بر این اساس، خطاها با عمق فرو رفتگی افزایش می‌یابند (شکل 7) و برای SPHERE2000 که بزرگترین شعاع‌های مؤثر را در بین پروب‌های بررسی شده دارد، بیشترین مقدار را دارند.

برای SPHERE20، شعاع اصلاح شده 7.05 نانومتر و شعاع AFM/هرتز 8.14 نانومتر است، یعنی +15.5% تخمین بیش از حد (جدول 3). برای SPHERE2000، شعاع اصلاح شده 28.3 نانومتر در مقابل 44.7 نانومتر از AFM/هرتز است، یعنی +57.9% تخمین بیش از حد. بنابراین، تطابق بهتری با SPHERE20 (کوچکترین بایاس) حاصل می‌شود، در حالی که SPHERE2000، با شعاع نوک بزرگ، تغییر شکل غیر تحت فشار را در عمق تا می‌کند و سطح تماس ظاهری را افزایش می‌دهد (شکل 6).