



شناسایی خواص مکانیکی نانوتیر کروم با روش بهینه‌سازی کلونی زنبور عسل مصنوعی بر اساس تحلیل خیز بزرگ با اثرات سطح

یاسر تقی‌پور لاهیجانی^{۱*}، احمد مشایخی^۲، وحید مدانلو^۲، بهنام آخوندی^۲، امین صفی‌جهانشاهی^۲

۱- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ولیعصر (عج) رفسنجان، رفسنجان، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سیرجان، سیرجان، ایران

* ایمیل نویسنده مسئول: ytaghipour@vru.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

مقاله پژوهشی

دریافت: ۲۶ تیر ۱۴۰۲

پذیرش: ۲۷ آبان ۱۴۰۲

کلیدواژگان:

خواص مکانیکی

نانوتیر کروم

کلونی زنبور عسل مصنوعی

خیز

اثرات سطح

در این تحقیق، با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی کلونی زنبور عسل مصنوعی خواص مکانیکی نانوتیر کروم به‌گونه‌ای شناسایی شده است که خطای مدل ریاضی در تفسیر نتایج تجربی حداقل گردد. از آنجا که تئوری‌های محیط پیوسته مرسوم نمی‌توانند رفتار سازه‌ها در مقیاس نانو را به درستی شبیه‌سازی کنند، به علاوه، خیز بزرگ در ابعاد نانو دور از انتظار نیست، لذا، مدل‌سازی ریاضی خیز بزرگ تیر بر پایه اثرات سطح جهت پیش‌بینی رفتار نانوتیر کروم مد نظر قرار گرفته است. خواص مکانیکی نانوتیر کروم مقدار مدول الاستیک، مقدار تنش مانده سطح و خواص تکیه‌گاهی، یعنی، شیب اولیه تیر در تکیه‌گاه و ضریب فنر خمشی تکیه‌گاه در نظر گرفته شده‌اند. در این تحقیق اثرات خواص مکانیکی بر رفتار نانوتیر، هم به صورت مجزا و هم به صورت یکجا بررسی شده‌اند. مشخص گردیده است که برای شبیه‌سازی رفتار دقیق نانوتیر، هر چهار پارامتر باید در نظر گرفته شوند. به علاوه، در بین خواص مکانیکی مورد بررسی، حذف خواص تکیه‌گاهی در محاسبه خیزها، بیشترین خطا و حذف اثرات سطح کمترین خطا را ایجاد می‌کند. در ضمن، خطا در مقایسه با مراجع قبلی به مراتب کمتر شده است.

Identifying the mechanical properties of chromium nanobeams with artificial bee colony optimization method based on large deflection analysis with surface effects

Yasser Taghipour Lahijani^{1*}, Ahmad Mashayekhi², Vahid Modanloo², Behnam Akhondi², Amin Safi Jahanshahi²

1- Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, Iran

2- Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Sirjan University of Technology, Sirjan, Iran

* Corresponding Author's Email: ytaghipour@vru.ac.ir

Article Information

Abstract

Original Research Paper

Received: 17 July 2023

Accepted: 18 November 2023

Keywords:

Mechanical Properties

Chromium Nanobeam

Artificial Bee Colony

Deflection

Surface Effects

In this research, by using an artificial bee colony optimization algorithm, the mechanical properties of chromium nanobeams have been identified in such a way that the error of the mathematical model in the interpretation of the experimental results be minimized. Since conventional continuous medium theories cannot correctly simulate the behavior of structures in the nanoscale, also, large deflections in nano dimensions are not far from expected, therefore, the mathematical modeling of the large deflections of the beam based on surface effects is considered to predict the behavior of chromium nanobeams. The mechanical properties of chromium nanobeam have been considered the value of elastic modulus, the value of residual surface stress and the values of support properties, that is, the value of initial slope of the beam at the support and the value of bending spring coefficient of the support. In this research, the effects of mechanical properties have been investigated separately and simultaneously on the behavior of nanobeams. It has been determined that all four parameters must be considered to simulate the exact behavior of the nanobeam. In addition, among the investigated mechanical properties, removing the support properties in the prediction of experimental deflections causes the most errors, and removing the surface effects causes the least errors. Furthermore, the error has been reduced by far compared to previous works.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Taghipour Lahijani Y, Mashayekhi A, Modanloo V, Akhondi B, Safi Jahanshahi A. Identifying the mechanical properties of chromium nanobeams with artificial bee colony optimization method based on large deflection analysis with surface effects. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2023 June 22;10(4):48-61. doi: 10.22034/IJME.2023.407356.1811 [In Persian]

۱- مقدمه

در بین سازه‌های کوچک (سازه‌های با ابعاد میکرو یا نانو^۱) شامل نانوتیرها، نانوصفحات، نانوپوسته‌ها و نانولوله‌ها، نانوتیرها یکی از سازه‌های مورد توجه هستند. نانوتیرها کاربردهای متعددی را به عنوان محرک و حسگر، در سامانه‌های نانومکانیکی، نانوالکترومکانیکی و حسگرهای زیستی به خود اختصاص داده‌اند [۷-۱]. روش‌های تجربی مختلفی، مانند آزمایش‌های کششی، آزمون‌های خمش استاتیکی/دینامیکی، آزمون‌های دندان‌های نانو و آزمایش‌های تحریک تشدید، برای تعیین خواص مکانیکی در مقیاس نانو استفاده شده‌اند [۸-۱۱]. خمش نانوتیرها با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی^۲ یکی از محبوب‌ترین روش‌های آزمایش، برای تعیین مشخصات مواد در مقیاس نانو است [۱۲-۱۶].

نیلسون و همکاران [۱۲] نانوتیرهای کرومی یکسر گیردار با طول 2000 nm، عرض 150 nm و ضخامت 50 nm را ساخته‌اند. سپس، با استفاده از یک میکروسکوپ نیروی اتمی، آن‌ها را بارگذاری کرده و هم‌زمان خیز را اندازه‌گیری کردند. آن‌ها در بررسی رفتار نانوتیرها با استفاده از تئوری کلاسیک الاستیسیته و فرض خیز کوچک، مقادیر مدول الاستیک را گزارش کردند. مقادیر مدول الاستیک کوچک‌تر از مقدار آن در مقیاس بزرگ (مقیاس ماکرو^۳) و وابسته به مقادیر نیرو و طول تیر تحت بارگذاری به دست آمدند. نیلسون و همکاران [۱۳] مشابه مرجع [۱۲] خواص مکانیکی نانوتیرهای کرومی با ابعادی متفاوت را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها نانوتیرهای به طول 3000 nm، عرض متوسط 175 nm و ضخامت‌های 68 nm و 83 nm را ساخته و رفتار مکانیکی آن‌ها را بررسی کردند. در این حالت هم خیزهای بزرگ، اما کمتر از مرجع [۱۲] را، به خاطر ضخامت بیشتر نانوتیرها، گزارش دادند. در این کار با استفاده از فرض خیز کوچک در نظریه الاستیسیته مرسوم و بررسی رابطه نرخ خیز با نرخ بارگذاری، مقادیر مدول الاستیک که وابسته به ضخامت تیر است، حاصل شد.

ساندرگارد و همکاران [۱۷] با استفاده از تئوری اویلر و خیز بزرگ، رفتار نانوتیرهای یکسر گیردار از جنس کروم مرجع [۱۳] را شبیه‌سازی کردند. آن‌ها نیروی معادل و مدول الاستیک را طوری برازش کردند که با استفاده از مدل ریاضی، نتایج تجربی با دقت خوبی به دست آیند. آن‌ها فرض یک شیب اولیه و کوچک ابتدای نانوتیرهای یکسر گیردار را به عنوان یک واقعیت غیر قابل انکار بیان و در نظر گرفتند. مقادیر مدول الاستیک و نیروی معادل به صورت وابسته به ضخامت نانوتیر به دست آمدند.

در مقاله‌های زیادی [۱۱-۱۵، ۱۷-۱۹]، تفسیر رفتار نانو ساختارها با نظریه الاستیسیته کلاسیک، با شرط وابستگی خواص ماده، مانند مدول الاستیک به اندازه (طول و ضخامت تیر) و شرایط مرزی و تکیه‌گاهی مطرح شده است. وابستگی خواص مکانیکی سازه به اندازه آن، به معنی عدم توان نظریه مورد استفاده برای تحلیل رفتار سازه، مستقل از ابعاد آن است.

سپساتیاری و راجاپاکسه [۲۰] یک مدل خیز بزرگ برای تیرها ارائه داده‌اند که اثرات انرژی سطحی را در نظر گرفته است. آن‌ها نشان دادند که مدل پیشنهادی آن‌ها، قادر به شبیه‌سازی آزمایش‌های [۱۳] با استفاده از ویژگی‌های مستقل از اندازه، شامل مدول الاستیک مقیاس بزرگ (ماکرو) و تنش مانده سطح است. آن‌ها تنش مانده سطح و شیب‌های اولیه ابتدای تیرها را با سعی و خطا تعیین کردند.

تقی پور و همکاران [۲۱] یک مدل اجزاء محدود برای تحلیل خیز بزرگ تیرها ارائه کردند که اثرات سطح را در نظر گرفته است. در این کار، علاوه بر یک شیب اولیه در ابتدای نانوتیرهای یکسر گیردار، بجای تکیه‌گاه کاملاً گیردار، یک فنر خمشی با سختی ثابت را در نظر گرفتند. آن‌ها، آزمایش‌های مراجع [۱۲، ۱۳] را با دقت خوبی شبیه‌سازی کردند. آن‌ها تنش مانده سطح، سختی‌های فنر خمشی و شیب‌های اولیه ابتدای تیرها را با سعی و خطا تعیین نمودند.

وقتی تعداد پارامترها یا خواص مورد بررسی کم باشد، تعیین خواص به روش سعی و خطا، به سادگی انجام می‌شود. اما در حالتی که تعداد خواص مستقل مورد بررسی زیاد باشد، یک روش فرا ابتکاری کارآمد می‌تواند مؤثرتر باشد. الگوریتم‌های هوش جمعی روش‌هایی فرا ابتکاری و تکاملی هستند که برای حل مسائل پیچیده مهندسی استفاده می‌شوند. این روش‌ها الهام گرفته از طبیعت بوده و شامل الگوریتم بهینه‌سازی پرتو، روش بهینه‌سازی جایا، الگوریتم جستجوی کلاغ، روش بهینه‌سازی کلونی زنبورهای عسل مصنوعی و روش بهینه‌سازی مورچگان هستند که در مسائل مهندسی مختلفی استفاده می‌شوند [۲۲-۲۶].

¹ The Micro or Nano Scale Structures

² Atomic Force Microscopy

³ The Macroscale

انگیزه اصلی در این تحقیق، استفاده از روش بهینه‌سازی زنبور عسل مصنوعی در کنار مدل ریاضی، برای شناسایی خواص مکانیکی با در نظر گرفتن تمام حالات ممکن برای داشتن پاسخ مناسب می‌باشد. شناسایی خواص مکانیکی نانوتیر کروم (شامل مدول الاستیک، تنش مانده سطح، شیب اولیه تیر در تکیه‌گاه و سختی خمشی در محل تکیه‌گاه) با هدف کمینه شدن، اختلاف بین خیزهای تئوری نانوتیر و خیزهای تجربی انجام شده است. در ادامه، مدل ریاضی تحلیل خیز تیر و روش بهینه‌سازی زنبور عسل مصنوعی آورده شده است. در بخش چهارم نتایج بررسی و شناسایی خواص برای هر ضخامت، در چهار حالت ارائه شده است. نتایج بررسی و شناسایی خواص برای همه ضخامت‌ها به‌طور یکجا، در بخش پنجم گزارش شده است. در انتها، بحث و بررسی نتایج و نتیجه‌گیری آورده شده است.

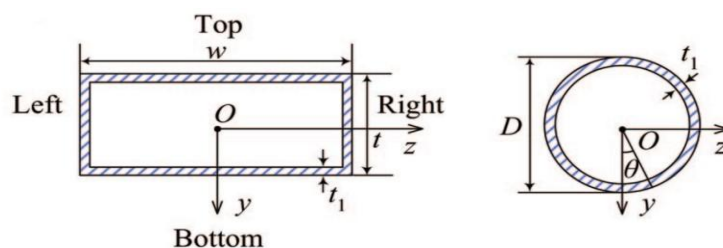
۲- تئوری تحقیق

در این بخش، در دو قسمت، شامل مدل ریاضی تحلیل خیز بزرگ تیر با در نظر گرفتن اثرات سطح و روش بهینه‌سازی کلونی زنبور عسل مصنوعی، تئوری تحقیق شرح داده شده است.

۲-۱- مدل تحلیل خیز تیر با اثرات سطح

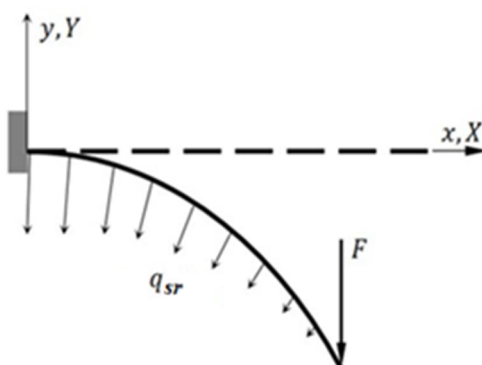
در این تحقیق از مدل خیز بزرگ تیر با در نظر گرفتن اثرات سطح استفاده می‌شود [۱۶، ۲۱، ۲۷]. در ابتدا تئوری اثرات سطح و سپس مدل ریاضی تحلیل خیز تیر شرح داده شده است. در ادامه، بر اساس فرمول‌بندی اجزاء محدود، معادلات حاکم محاسبه و روش حل بیان شده است.

اثرات سطح برای تحلیل خیز نانوتیر، بر پایه معادله یانگ-لاپلاس عمومی استفاده شده است که خواص مکانیکی و معادلات ساختاری متفاوت برای سطح و درون ماده فرض و کنش و واکنش اثرات متقابل بین سطح و درون ماده لحاظ می‌گردد (شکل ۱).



شکل ۱ سطح مقطع نانوتیر، شامل هسته و پوسته، در دو حالت دایره‌ای و مستطیلی [۲۱]

به علاوه، بار گسترده ناشی از اثرات سطح در نظر گرفته می‌شود. در شکل ۲ نمایش بار گسترده با نماد q_{sr} ، که حاصل تنش مانده سطح مثبت است، در تمام طول تیر و در جهت عمود بر محور آن، برای تیر تحت بار متمرکز نشان داده شده است.



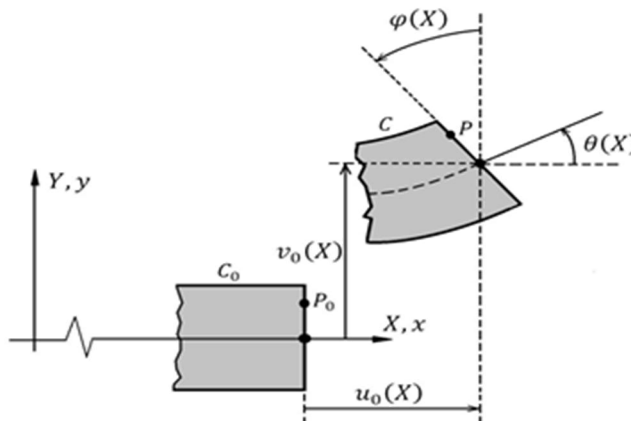
شکل ۲ بار گسترده حاصل از تنش مانده سطح مثبت [۲۱]

تغییر شکل سطح مقطع تیر بر اساس تئوری تیموشنکو، مطابق شکل ۳ در نظر گرفته شده است. مختصات جاری یک نقطه از سطح مقطع مانند نقطه P به صورت روابط ۱ و ۲ بیان می‌شود [۲۸]:

$$x = X + u_0 - Y \sin \varphi \quad (1)$$

$$y = v_0 + Y \cos \varphi \quad (2)$$

که u_0 و v_0 به ترتیب جابجایی‌های مرکز سطح مقطع در جهت‌های X و Y هستند و φ و θ به ترتیب چرخش سطح مقطع و شیب محور تیر می‌باشند.



شکل ۳ سینماتیک لاگرانژی سطح مقطع تیر طبق تئوری تیموشنکو [۲۱]

در فرمول‌بندی اجزاء محدود کاملاً لاگرانژی، یک المان دو گره‌ای برای تیر منشوری مستقیم در نظر گرفته شده است. المان دو گره‌ای، دارای شش درجه آزادی است. این شش درجه آزادی المان و نیروهای گرهی متناظر آن‌ها، در بردارهای جابجایی گره‌ای u نیروی گره‌ای f به صورت رابطه ۳ جمع شده‌اند [۲۸]:

$$u = \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ \varphi_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ \varphi_2 \end{bmatrix}, f = \begin{bmatrix} f_{X1} \\ f_{Y1} \\ M_1 \\ f_{X2} \\ f_{Y2} \\ M_2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

اولین وردش انرژی داخلی نسبت به جابجایی‌های گره‌ای به صورت روابط ۴ و ۵ نوشته می‌شود [۲۸]:

$$\delta U = p^T \delta u \quad (4)$$

$$\delta h = B \delta u \quad (5)$$

با نوشتن $u_0(X)$ ، $v_0(X)$ و $\varphi(X)$ بر حسب توابع شکل لاگرانژی و مؤلفه‌های بردار جابجایی u و مشتق‌گیری جزئی از e ، γ و κ_φ نسبت به جابجایی‌های گره‌ای، B به دست آمده است. بردار نیروی داخلی p به صورت رابطه ۶ تعریف شده است [۲۸]:

$$p = \int_{L_0} B^T z d\bar{X} \quad (6)$$

با گرفتن اولین وردش از بردار نیروی داخلی p ، ماتریس سفتی مماسی K ، به صورت رابطه ۷ تعریف شده است [۲۸]:

$$\delta p = \int_{L_0} (B^T \delta z + \delta B^T z) d\bar{X} = K \delta u \quad (7)$$

در نتیجه، نرخ افزایش بردار جابجایی عمومی δu ، در هر تکرار با رابطه ۸ محاسبه شده است [۲۸]:

$$\delta u = K^{-1} \delta p \quad (8)$$

بر این اساس، رابطه نرخ به صورت رابطه ۹ حاصل می‌شود [۲۱]:

$$u^{(r+1)} = u^{(r)} + [K^{(r)}]^{-1} (p^{(r+1)} - p^{(r)}) \quad (9)$$

که در این رابطه r شماره تکرار است. $p^{(r+1)}$ به صورت رابطه ۱۰ محاسبه شده است [۲۱]:

$$p^{(r+1)} = f_{ex}^{(r)} + f_{sr}^{(r)} \quad (10)$$

که در این رابطه بردار نیروی $f_{ex}^{(r)}$ از بار خارجی و بردار نیروی $f_{sr}^{(r)}$ از اثرات سطح، یعنی بر اساس q_{sr} تعیین می‌گردد. از آنجا که $f_{sr}^{(r)}$ به تغییر شکل وابسته است. لذا، هر مرحله بارگذاری، باید چندین بار تکرار گردد، تا پاسخ دقیق حاصل گردد.

۲-۲- روش بهینه‌سازی کلونی زنبور عسل مصنوعی

این روش که در سال ۲۰۰۵ توسط کارابوگا ارائه شد، الهام گرفته از رفتار زنبورهای عسل دریافتن بهترین شهد گل است [۲۹]. در یک کندوی واقعی، سه گروه زنبور عسل وجود دارد: (۱) زنبورهای کارگر، (۲) ناظر و (۳) پیشاهنگ. زنبورهای کارگر در اطراف کندو دنبال شهد می‌گردند و یک شهد از هر گلی که یافته‌اند را با خود به کندو می‌آورند. سپس کیفیت شهدها را داخل کندو به وسیله رقص‌هایی در کندو به اشتراک گذاشته و بهترین شهد مشخص می‌شود. زنبورهای ناظر اطلاعات زنبورهای کارگر را دیده و به صورت اتفاقی به جستجوی شهد در اطراف کندو می‌پردازند و با احتمال بیشتری به حوالی مکانی می‌روند که بهترین شهد از آنجا آورده شده است. اگر کیفیت شهد آورده شده توسط زنبورها، از شهدهای پیشین بهتر نباشد، زنبورهای ناظر به پیشاهنگ‌هایی تبدیل می‌شوند که شروع به جستجو در مکان‌های اتفاقی جدید می‌کنند. بدین وسیله، زنبورها آرام آرام مکان بهترین شهد را یافته و آن را کشف می‌کنند. بر این اساس در روش بهینه‌سازی زنبور عسل مصنوعی، ابتدا تعدادی جواب در محدوده مجاز پارامترها حدس زده می‌شود. سپس، کیفیت هر جواب با تابع برازشی سنجیده شده و بهترین جواب مشخص می‌شود. در دور بعدی بهینه‌سازی و حدس جواب‌ها، جواب‌هایی اتفاقی اما با احتمال ایجاد اطراف جواب بهینه قبل ایجاد می‌شوند. این روند تکرار می‌شود تا جواب بهینه یافته شده یا شرطی دیگر برقرار گردد (مانند انجام تعداد خاصی از تکرار و یا عدم بهبود جواب در چند تکرار متوالی).

در پیاده‌سازی الگوریتم، تعداد زنبورها را با n و تعداد پارامترهای مجهول را با m نشان داده و ابتدا جمعیت اولیه‌ای اتفاقی به صورت (X_1, X_2, \dots, X_n) ایجاد شده به صورتی که هر کدام از مؤلفه‌های آن پاسخی از مسئله و در محدوده مجاز پارامترها باشد. کران پایین و بالای جواب‌ها را به ترتیب با χ_{min} و χ_{max} نشان داده و $RAND$ را عددی اتفاقی بین صفر و یک در نظر گرفته، آنگاه جواب جدید به صورت رابطه ۱۱ است:

$$\chi_{ij} = \chi_{min j} + RAND(\chi_{max j} - \chi_{min j}) \quad (11)$$

که در این رابطه $m, z = 1, 2, \dots, m$ و $n, i = 1, 2, \dots, n$ است. سپس هر زنبور کارگر اطراف شهدهای یافت شده به صورت اتفاقی گشته تا شهدهای جدید و ترجیحاً بهتر را پیدا کند، یعنی (رابطه ۱۲):

$$\chi_{ij}^{new} = \chi_{ij} + \Phi_{ij}(\chi_{ij} - \chi_{kj}) \quad (12)$$

که در این رابطه $m, z = 1, 2, \dots, m$ ، $n, k = 1, 2, \dots, n$ و $j \neq k$ تعریف شده است. همچنین Φ_{ij} تابعی تصادفی بین -1 تا +1 با توزیع یکنواخت است. بایستی توجه داشت که مقدار χ_{ij}^{new} نباید از محدوده χ_{Min} و χ_{Max} خارج باشد.

در ادامه شهدهای جدید طبق معادلات پیشین کشف شده و کیفیت شهد آن‌ها در کندو بررسی می‌شود. یعنی جواب‌هایی جدید مطابق معادلات ذکر شده ایجاد شده و کیفیت آن‌ها با توابع برازشی بررسی می‌شود. اگر بهترین جواب به دست آمده از بهترین جواب مرحله قبل بهتر بود، این جواب جدید جایگزین قبلی می‌شود. پس از اتمام جستجو احتمال هر یک از پاسخ‌ها با استفاده از معادله ۱۳ مشخص می‌شود:

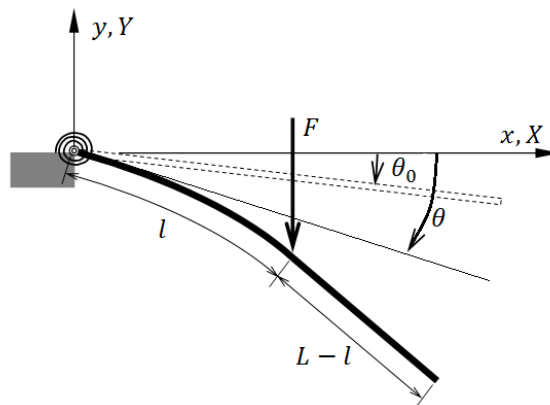
$$P_i = \frac{Fit_i}{\sum_{i=1}^n Fit_i} \quad (13)$$

که در این رابطه Fit_i کیفیت هر جواب برای جواب شماره i است. در نهایت، زنبورهای کارگر جدید مطابق با معادله ۱۳ به دنبال یافتن جواب‌های جدید می‌روند تا بهترین جواب را بروزرسانی کنند. اگر کیفیت جواب در چند مرحله تکراری بهتر نشد، زنبورهای پیشاهنگ مطابق معادله ۱۲ به دنبال یافتن جواب‌های جدید می‌روند. روند ذکر شده در بالا آن قدر تکرار می‌شود که مسئله بهینه‌سازی به جواب موردنظر برسد، یا اینکه تعداد مشخصی از تکرار آن انجام شود.

در این مقاله، خواص مکانیکی مورد بررسی برای نانوتیر کروم، پارامترهای مدول الاستیک (E)، تنش مانده سطح (τ_0)، شیب اولیه تکیه‌گاه تیر (θ_0) و سختی فنر خمشی در تکیه‌گاه (K_S) هستند. مطابق شکل ۴، نانوتیر بار گذاری شده در طول l ، با شیب اولیه تکیه‌گاه تیر (θ_0) و سختی فنر خمشی در تکیه‌گاه (K_S) نشان داده شده است. چهار پارامتر مذکور توسط روش بهینه‌سازی زنبور عسل مصنوعی به گونه‌ای شناسایی شده‌اند که خطای بین محاسبه خیز با مدل ریاضی و خیز تجربی کمینه شود. معادله خطای مورد بررسی در این مقاله به صورت معادله ۱۴ است:

$$Error = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (v_{exp,i} - v_{the,i})^2}{n}} \quad (14)$$

که در این رابطه خطا از نوع خطای جذر میانگین مربعات^۱، n تعداد خیزهای مورد بررسی، v_{exp} خیز تجربی و v_{the} خیز محاسبه شده با مدل ریاضی است.



شکل ۴ نمایش نانوتیر به طول کلی l ، تحت بارگذاری در موقعیت l ، با تکیه‌گاه یکسر گیردار اصلاح شده، با شیب اولیه θ_0 و سختی خمشی در انتهای درگیر با استفاده از یک فنر خمشی روی مفصل ساده [۲۱]

این نتایج در دو حالت کلی محاسبه و مقایسه شده‌اند. در حالت اول، خواص مکانیکی بهینه برای هر ضخامت به صورت جداگانه محاسبه شده‌اند (بخش چهارم). در حالت دوم، خواص مکانیکی با در نظر گرفتن همه نتایج تجربی، شامل هر سه ضخامت، تعیین شده‌اند (بخش پنجم). در همه حالت‌های بهینه‌سازی به روش زنبور عسل مصنوعی، با در نظر گرفتن 60 زنبور و تعداد 20,000 تکرار بر روی یک کامپیوتر با 8 GB رم و دارای پردازنده Core i3 – 3.6GHz انجام شد.

۳- نتایج بهینه‌یابی

۳-۱- نتایج بهینه‌یابی مجزا برای هر ضخامت

شناسایی خواص مکانیکی در چهار حالت مختلف و برای هر سه ضخامت (یعنی 50، 68 و 83 nm) به صورت مجزا انجام شده است. یعنی مقادیر خواص مکانیکی نانوتیرها برای هر ضخامت به گونه‌ای به دست آمده است که اختلاف بین خیز تجربی نانوتیر و خیز تئوری آن کمینه شود. در حالت اول مقدار بهینه مدول الاستیک برای هر ضخامت، با صرف نظر از اثر دیگر خواص مکانیکی تعیین شده است. در حالت دوم، مقادیر مدول الاستیک و تنش مانده سطح با بررسی نتایج مدل ریاضی به دست آمده‌اند. در حالت سوم، اثر مقادیر مدول الاستیک، شیب اولیه تکیه‌گاه و سختی فنر خمشی بر نتایج بررسی شده و مقادیر شناسایی شده‌اند. در حالت چهارم، همه متغیرها در نظر گرفته شده‌اند.

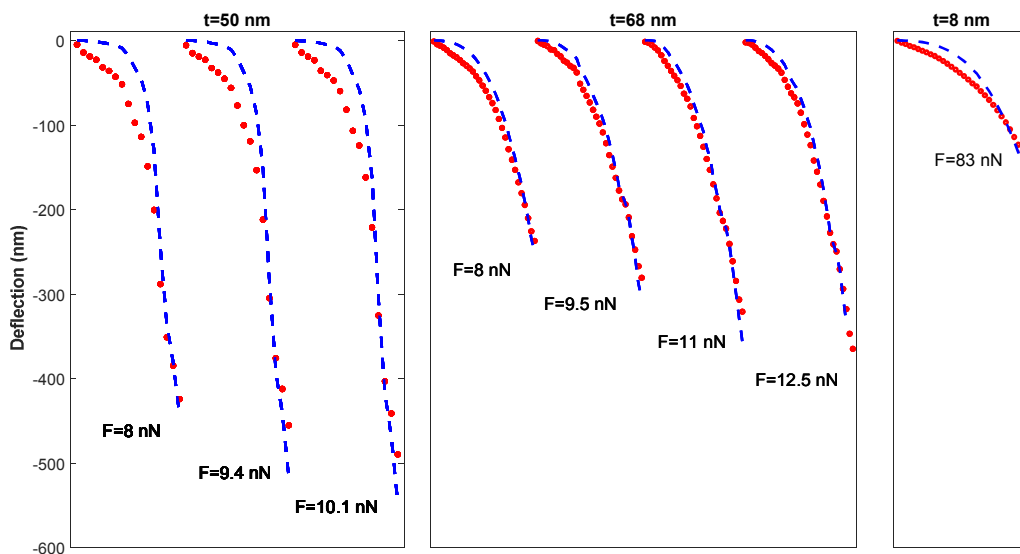
¹ Root-Mean-Square Deviation (RMSD)

۳-۱-۱- مقادیر بهینه مدول الاستیک برای هر ضخامت

در این قسمت مقدار بهینه مدول الاستیک برای هر ضخامت، شناسایی شده است. مقدار تنش مانده سطح صفر و تکیه‌گاه کاملاً گیردار فرض شده است. به علاوه، شیب اولیه تکیه‌گاه تیر صفر و سختی فنر خمشی در تکیه‌گاه بی‌نهایت (عددی بزرگ) در نظر گرفته شده است. جدول ۱ مقادیر مدول الاستیک شناسایی شده برای هر ضخامت را نشان می‌دهد. نمودار مقایسه خیز تجربی نانوتیر و خیز تئوری نانوتیر در حالتی که نانوتیر فقط با مدول الاستیک مدل‌سازی شود در شکل ۵ نشان داده شده است.

جدول ۱ مقادیر مدول الاستیک شناسایی شده برای هر ضخامت

t(nm)	50	68	83
E(GPa)	24.333	55.513	49.053
Er(nm)	43.099	14.715	12.022



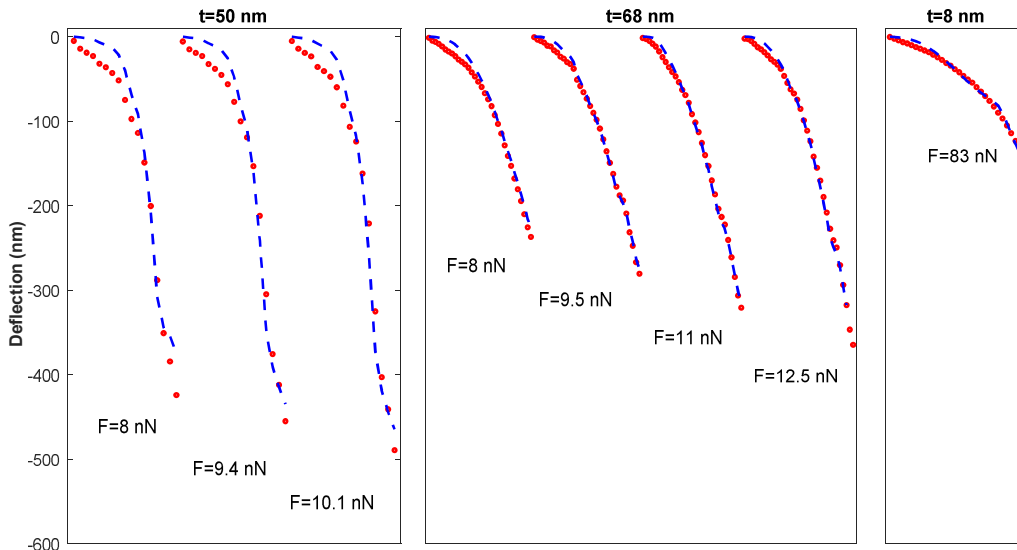
شکل ۵ نمودار مقایسه خیز تجربی نانوتیر (دایره قرمز رنگ) و خیز تئوری نانوتیر (خط چین آبی رنگ) با لحاظ مدول الاستیک

۳-۱-۲- مقادیر بهینه مدول الاستیک و تنش مانده سطح در هر ضخامت

در این قسمت مقادیر مدول الاستیک و تنش مانده سطح برای هر ضخامت، شناسایی شده‌اند. تکیه‌گاه کاملاً گیردار و بدون شیب اولیه در نظر گرفته شده است. مقادیر مدول الاستیک و تنش مانده سطح شناسایی شده برای هر ضخامت در جدول ۲ آورده شده است. نمودار مقایسه خیز تجربی نانوتیر و خیز تئوری نانوتیر در حالتی که نانوتیر با مدول الاستیک و تنش مانده سطح مدل‌سازی شود، در شکل ۶ نشان داده شده است.

جدول ۲ مقادیر مدول الاستیک و تنش مانده سطح شناسایی شده برای هر ضخامت

t(nm)	50	68	83
E(GPa)	9.509	36.600	16.900
τ_0 (N/m)	-0.130	-0.260	-0.670
Er(nm)	24.141	6.820	4.155



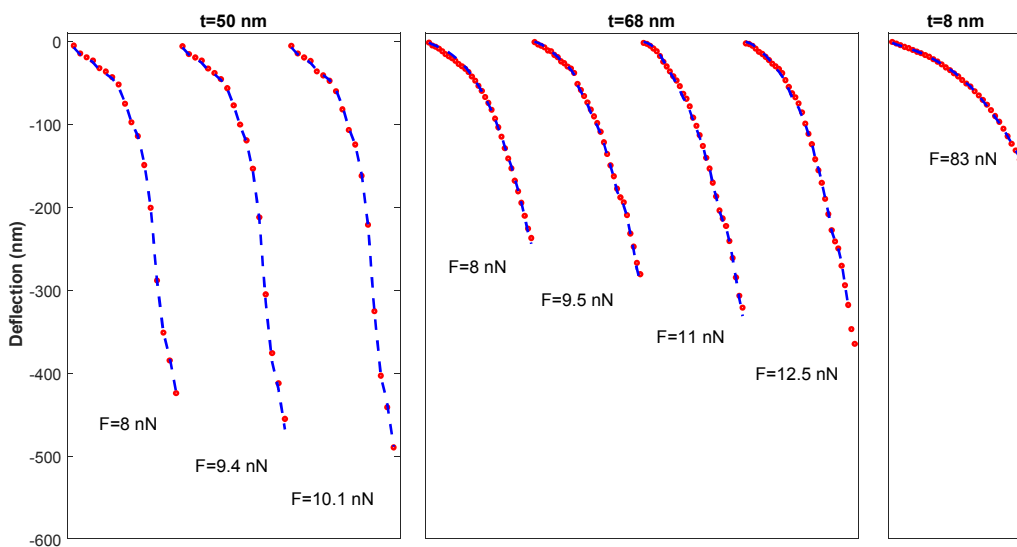
شکل ۶ نمودار مقایسه خیز تجربی نانوتیر (دایره قرمز رنگ) و خیز تئوری نانوتیر (خط چین آبی رنگ) با لحاظ مدول الاستیک و تنش مانده سطح

۳-۱-۳- مقادیر بهینه مدول الاستیک شیب اولیه تکیه گاه و سختی فنر خمشی تکیه گاه در هر ضخامت

در این قسمت مقادیر مدول الاستیک و خواص تکیه گاه شامل شیب اولیه تکیه گاه و سختی فنر خمشی تکیه گاه برای هر ضخامت، شناسایی شده اند. مقدار تنش مانده سطح صفر فرض شده است. مقادیر مدول الاستیک، شیب اولیه تکیه گاه و سختی فنر خمشی تکیه گاه شناسایی شده برای هر ضخامت در جدول ۳ فهرست شده است. نمودار مقایسه خیز تجربی نانوتیر و خیز تئوری نانوتیر در حالتی که نانوتیر با مدول الاستیک، شیب اولیه تکیه گاه و سختی فنر خمشی تکیه گاه مدل سازی شود در شکل ۷ ارائه شده است.

جدول ۳ مقادیر مدول الاستیک، شیب اولیه تکیه گاه و سختی فنر خمشی تکیه گاه شناسایی شده برای هر ضخامت

t(nm)	50	68	83
E(GPa)	77.200	94.160	116.581
θ_0 (rad)	-0.086	-0.011	-0.013
$K_s(N.m/rad) * 10^{-14}$	23.485	115.497	200.000
Er(nm)	3.098	2.560	0.842



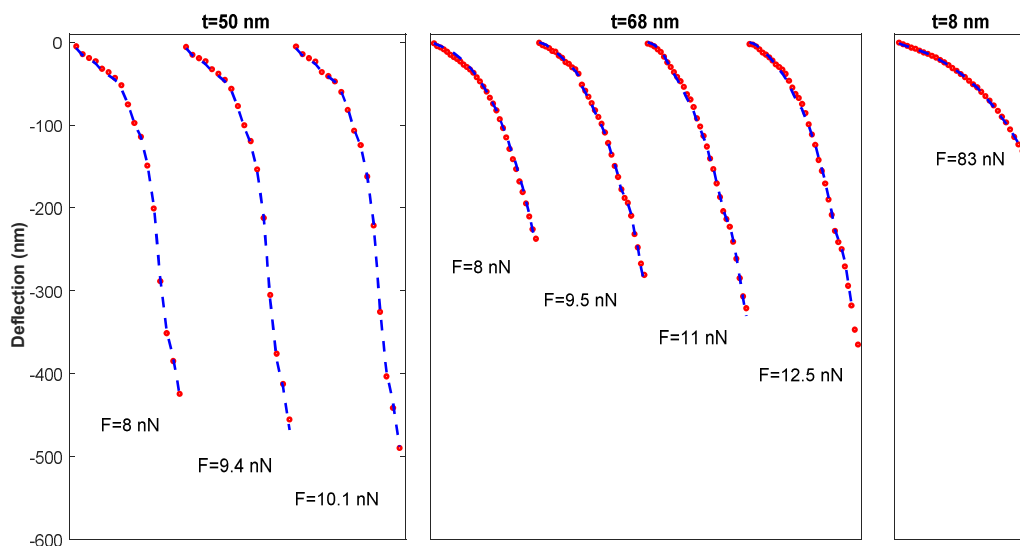
شکل ۷ نمودار مقایسه خیز تجربی نانوتیر (دایره قرمز رنگ) و خیز تئوری آن (خط چین آبی رنگ) با لحاظ مدول الاستیک، شیب اولیه و سختی فنر خمشی در تکیه گاه

۳-۱-۴- مقادیر بهینه مدول الاستیک، تنش مانده سطح، شیب اولیه تکیه‌گاه و سختی فنر خمشی تکیه‌گاه در هر ضخامت

در این قسمت مقادیر بهینه مدول الاستیک، تنش مانده سطح، شیب اولیه تکیه‌گاه و سختی فنر خمشی برای هر ضخامت، شناسایی و گزارش شده‌اند. مقادیر مدول الاستیک، تنش مانده سطح، شیب اولیه تکیه‌گاه و سختی فنر خمشی تکیه‌گاه شناسایی شده برای هر ضخامت در جدول ۴ آورده شده است. نمودار مقایسه خیز تجربی نانوتیر و خیز تئوری نانوتیر در حالتی که نانوتیر با مدول الاستیک، تنش مانده سطح، شیب اولیه تکیه‌گاه و سختی فنر خمشی تکیه‌گاه مدل‌سازی شود، در شکل ۸ نشان داده شده است.

جدول ۴ مقادیر مدول الاستیک، تنش مانده سطح، شیب اولیه تکیه‌گاه و سختی فنر خمشی تکیه‌گاه شناسایی شده برای هر ضخامت

t(nm)	50	68	83
E(GPa)	249.291	186.300	278.700
τ_0 (N/m)	0.401	0.392	1.195
θ_0 (rad)	-0.079	-0.010	-0.012
K_s (N.m/rad) * 10^{-14}	16.271	72.930	133.204
Er(nm)	3.109	3.081	0.658



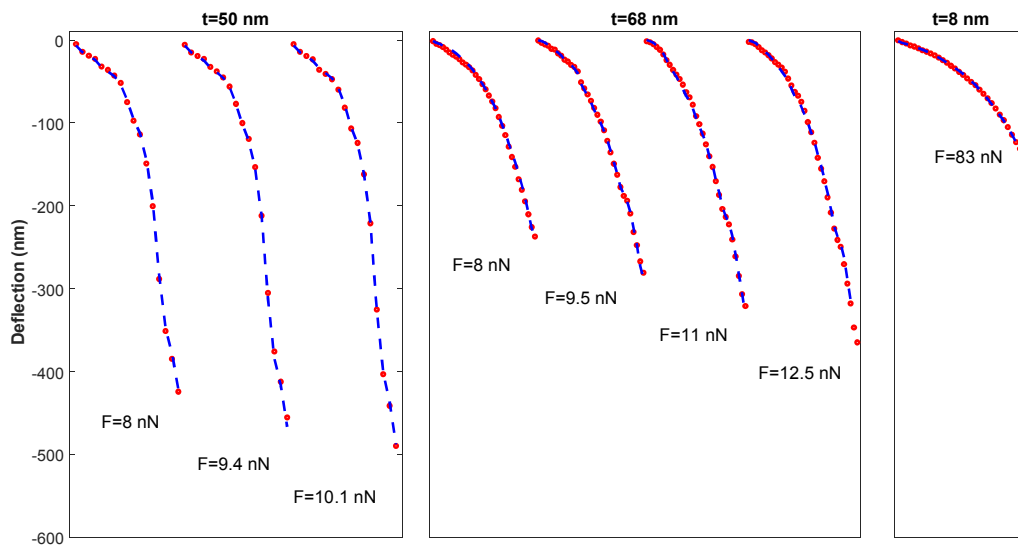
شکل ۸ نمودار مقایسه خیز تجربی نانوتیر (دایره قرمز رنگ) و خیز تئوری آن (خط چین آبی رنگ) با لحاظ مدول الاستیک، تنش مانده سطح، شیب اولیه و سختی فنر خمشی تکیه‌گاه

۳-۲- نتایج بهینه‌سازی با داده‌های همه ضخامت‌ها

در این بخش، بهینه‌سازی برای تعیین خواص مکانیکی (تنش مانده سطح، شیب اولیه تکیه‌گاه و سختی فنر خمشی) با در نظر گرفتن همه نتایج تجربی، شامل هر سه ضخامت تعیین شده است. از آنجایی که جنس نانوتیرهای کروم یکسان است، مدول الاستیک نانوتیرها یکسان و برابر با مدول الاستیک کروم در مقیاس بزرگ (ماکرو)، یعنی 248 GPa، در نظر گرفته و صحت این مقدار پیش‌تر در مراجع [۱۲، ۱۳] بررسی شده است. برای هر سه ضخامت تنش مانده سطح یکسان فرض شده است. شیب اولیه تکیه‌گاه (به دلیل تفاوت در فرآیند ساخت) و سختی فنر برای هر ضخامت متفاوت فرض شده است. مقادیر مدول الاستیک، تنش مانده سطح، شیب اولیه تکیه‌گاه در جدول ۵ آورده شده است. نمودار مقایسه خیز تجربی نانوتیر و خیز تئوری نانوتیر در حالتی که نانوتیر با مدول الاستیک، تنش مانده سطح، شیب اولیه تکیه‌گاه و سختی فنر خمشی تکیه‌گاه مدل‌سازی شود و مقادیر مدول الاستیک و تنش مانده سطح هر سه تیر یکسان فرض گردد، در شکل ۹ نشان داده شده است.

جدول ۵ مقادیر مدول الاستیک، تنش مانده سطح، شیب اولیه تکیه‌گاه و سختی فنر خمشی تکیه‌گاه شناسایی شده برای همه ضخامت‌ها

t(nm)	50	68	83
E(GPa)		248	
τ_0 (N/m)		0.599	
θ_0 (radian)	-0.087	-0.009	-0.012
K_s (N.m/rad) * 10^{-14}	19.444	64.426	120.443
Er(nm)		2.949	



شکل ۹ نمودار مقایسه خیز تجربی نانوتیر (دایره قرمز رنگ) و خیز تئوری آن (خط چین آبی رنگ) با لحاظ مدول الاستیک، تنش مانده سطح، شیب اولیه و سختی فنر خمشی تکیه‌گاه و فرض مقادیر یکسان مدول الاستیک و تنش مانده سطح برای هر سه ضخامت نانوتیر

۴- بحث و بررسی نتایج

در این قسمت، به بحث و بررسی نتایج شناسایی خواص مکانیکی نانوتیر کروم با استفاده از کلونی زنبور عسل مصنوعی پرداخته شده است. در حالت اول، تنها متغیر برای شناسایی، مدول الاستیک در نظر گرفته شده و نتایج برای هر ضخامت به صورت مجزا در جدول ۱ آورده شده است. چهار نکته وجود دارد، اول، مقدار خطا در هر ضخامت زیاد است. دوم، مقادیر مدول الاستیک وابسته به ضخامت هستند. سوم، مقادیر مدول الاستیک با مقدار واقعی آن در مقیاس بزرگ (ماکرو) فاصله زیادی دارند. چهارم، رابطه معناداری برای مقادیر مدول الاستیک در ضخامت‌های مختلف وجود ندارد. به نظر می‌رسد مدل‌سازی با مدول الاستیک و بدون در نظر گرفتن دیگر موارد، منطقی نیست. در حالت دوم، متغیرهای بهینه‌سازی، مدول الاستیک و تنش مانده سطح، در نظر گرفته شده و نتایج برای هر ضخامت به صورت مجزا در جدول ۲ آورده شده است. در این حالت، چهار مسئله وجود دارد، اول، مقدار خطا در هر ضخامت زیاد است ولی نسبت به حالت قبل، به مراتب خطاها کمتر هستند. لذا، در نظر گرفتن تنش مانده سطح علاوه بر مدول الاستیک را باید لازم تلقی کرد. دوم، مقادیر مدول الاستیک و تنش مانده سطح وابسته به ضخامت هستند. سوم، مقادیر مدول الاستیک با مقدار واقعی آن در مقیاس بزرگ (ماکرو) فاصله زیادی دارند. چهارم، رابطه معناداری برای مقادیر مدول الاستیک در ضخامت‌های مختلف وجود ندارد. در این حالت هم با افزودن تنش مانده سطح و کاهش خطاها، هنوز به نظر می‌رسد مدل‌سازی با این دو پارامتر، لازم هست، ولی کافی نیست. در حالت سوم، متغیرهای بهینه‌سازی، مدول الاستیک و خواص تکیه‌گاه شامل شیب اولیه تکیه‌گاه و سختی فنر خمشی تکیه‌گاه برای هر ضخامت، در نظر گرفته شده و نتایج برای هر ضخامت به صورت مجزا در جدول ۳ آورده شده است. در این حالت، سه نکته وجود دارد، اول، در هر حالت خطاها بسیار کم هستند. لذا، در نظر گرفتن خواص تکیه‌گاه شامل شیب اولیه تکیه‌گاه و سختی فنر خمشی تکیه‌گاه را باید لازم و قطعی دانست. دوم، مقادیر مدول الاستیک و خواص تکیه‌گاه وابسته به ضخامت هستند که این وابستگی به صورت کاهش مقدار با کاهش ضخامت است. وابستگی خواص تکیه‌گاهی به ضخامت قابل توجه است، شیب اولیه می‌تواند متأثر از

وزن باشد که با افزایش ضخامت، افزایش آن منطقی است و ضریب فنر خمشی هم قطعاً متأثر از ضخامت است و افزایش آن با ضخامت طبیعی است. با وجود رابطه معنادار برای مقادیر مدول الاستیک در ضخامت‌های مختلف، فقط با فرض وابستگی مقادیر مدول الاستیک به ضخامت و تفاوت آن با مقدار واقعی آن در مقیاس بزرگ (ماکرو) رفتار نانوتیرها قابل بررسی است. در حالت چهارم، متغیرهای بهینه یابی، مدول الاستیک، تنش مانده سطح و خواص تکیه‌گاه شامل شیب اولیه تکیه‌گاه و سختی فنر خمشی تکیه‌گاه برای هر ضخامت، در نظر گرفته شده و نتایج بهینه برای هر ضخامت، در جدول ۴ آورده شده است. با توجه به هدف، یعنی ارائه مدلی ریاضی و مستقل از اندازه برای توجیه رفتار نانوتیر کروم، مشخص است که امکان داشتن پاسخ با مقدار یکسان مدول الاستیک برای همه و همچنین، مقدار یکسان تنش ماده سطح برای همه ضخامت‌ها قابل بررسی است. لذا برای حالت پنجم، بهینه یابی با همه داده‌های تجربی و هفت متغیر انجام شد. مقدار مدول الاستیک برای همه ضخامت‌ها یکسان و برابر با مقدار آن در مقیاس بزرگ (ماکرو)، یعنی 248 GPa، فرض گردید. متغیرهای بهینه یابی، تنش مانده سطح یکسان برای همه ضخامت‌ها و خواص تکیه‌گاه شامل شیب اولیه تکیه‌گاه و سختی فنر خمشی تکیه‌گاه مستقل برای هر ضخامت، در نظر گرفته شده و نتایج بهینه یابی، در جدول ۵ آورده شده است. برای مقایسه خطای پنج حالت ذکر شده، مقادیر خطاها در جدول ۶ آورده شده است.

جدول ۶ مقادیر خطا برای همه حالات بررسی شده

حالت	t(nm)	Er(nm)
1	50	24.333
	68	55.513
	83	49.053
2	50	24.141
	68	6.820
	83	4.155
3	50	3.098
	68	2.560
	83	0.842
4	50	3.109
	68	3.081
	83	0.658
5	50	
	68	2.949
	83	

خطای مرجع [۲۱] 3.431 nm بوده است که در مقایسه نمودارهای پیش‌بینی خیزها، بسیار کمتر از مراجع قبلی [۱۷، ۲۰] بوده است. خطای به دست آمده در این مقاله برای تخمین خواص مکانیکی نانوتیر با استفاده از روش زنبور عسل مصنوعی 2.949 nm است که در مقایسه با مرجع مرجع [۲۱]، 16% کاهش یافته است.

۵- نتیجه‌گیری

مقدار تنش مانده سطح و خواص تکیه‌گاه شامل شیب اولیه تیر در تکیه‌گاه و ضریب فنر خمشی تکیه‌گاه، برای نانوتیر از جنس کروم به روش آزمایشگاهی تعیین نشده است. اما، خیزهای نانوتیر کروم در شرایط بارگذاری و ابعادی مختلف گزارش شده است. قبلاً با روش سعی و خطا، مقادیر خواص مذکور به گونه‌ای تعیین شده‌اند که خطا در پیش‌بینی نتایج تجربی با مدل‌های ریاضی کم شود. اما، اثر پارامترها، به صورت مجزا و تمام حالات ممکن برای داشتن پاسخ مناسب، به روشی نظام‌مند بررسی نشده است. لذا در این تحقیق، با استفاده از روش فرا ابتکاری زنبور عسل مصنوعی خواص مکانیکی نانوتیر کروم تعیین شده‌اند. مدل‌سازی ریاضی خیز بزرگ بر پایه

اثرات سطح، جهت شبیه‌سازی رفتار نانوتیرهای کروم مورد استفاده قرار گرفته است. خطا در محاسبه خواص مکانیکی نسبت به مراجع قبلی، در پیش‌بینی نتایج به مراتب کمتر شده است. بعلاوه، مشخص گردید که برای شبیه‌سازی واقعی باید همه خواص مکانیکی (مدول الاستیک، تنش ماده سطح، شیب اولیه تکیه‌گاه و ضریب فنر خمشی تکیه‌گاه) را در نظر گرفت.

فهرست علائم

B	ماتریس ضرایب (m^{-1})
C	ماتریس سفتی (N)
e	کرنش عمودی
E	مدول الاستیک (Nm^{-2})
Er	خطا (nm)
f	مؤلفه نیروی گرهی (N)
f	بردار نیروی المان (N)
Fit	کیفیت جواب
h	بردار کرنش عمومی
K	سختی فنر خمشی تکیه‌گاه (Nm^{-1})
K	ماتریس سفتی مماسی (Nm^{-1})
l	طول نانوتیر تا محل بارگذاری (m)
L	طول کل نانوتیر (m)
m	تعداد پارامترهای مجهول
M	گشتاور خمشی (Nm)
n	تعداد موارد یا پارامترها
N	نیروی محوری (N)
p	بردار نیروی داخلی (N)
P	احتمال هر پاسخ
q	بار گسترده (Nm^{-1})
r	شماره تکرار
$RAND$	عددی اتفاقی بین صفر و یک
$RSMD$	خطای جذر میانگین مربعات (m)
t	ضخامت نانوتیر (m)
u	بردارهای جابجایی المان (m)

علائم یونانی

φ	چرخش سطح مقطع (rad)
Φ	تابعی تصادفی بین -1 تا +1
θ	شیب محور تیر (rad)
γ	کرنش برشی (rad)
κ_{φ}	انحنا، معادل مشتق φ نسبت به X (m^{-1})
δ	وردش
τ	تنش مانده سطح (Nm^{-1})

χ	زنبور یا نمونه اولیه
بالانویس‌ها	
'	مشتق نسبت به X
-1	ماتریس معکوس
<i>new</i>	جدید
<i>T</i>	نشانه عملگر ترانهاده
زیرنویس‌ها	
0	مقدار اولیه
1	گره اول المان
2	گره دوم المان
<i>ex</i>	بارگذاری خارجی
<i>exp</i>	تجربی یا آزمایشگاهی
<i>i</i>	شمارنده، عدد صحیح، بین یک تا n
<i>j</i>	شمارنده، عدد صحیح، بین یک تا m
<i>min</i>	کران پایین
<i>max</i>	کران بالا
<i>o</i>	مرکز هندسی سطح مقطع تیر
<i>s</i>	فتر خمشی تکیه‌گاه
<i>sr</i>	اثرات سطح
<i>the</i>	تئوری

Reference

- [1] Sahmani S, Mohammadi Aghdam M. Small scale effects on the large amplitude nonlinear vibrations of multilayer functionally graded composite nanobeams reinforced with graphene-nanoplatelets. *International Journal of Nanoscience and Nanotechnology*: 2018;14(3):207-27.
- [2] Sarafraz A, Sahmani S, Aghdam MM. Nonlinear secondary resonance of nanobeams under subharmonic and superharmonic excitations including surface free energy effects. *Applied Mathematical Modelling*: 2019;66:195-226. doi: 10.1016/j.apm.2018.09.013
- [3] Sahmani S, Fattahi AM, Ahmed N. Analytical mathematical solution for vibrational response of postbuckled laminated FG-PLRC nonlocal strain gradient micro-/nanobeams. *Engineering with Computers*: 2019;35:1173-89. doi: 10.1007/s00366-018-0657-8
- [4] Xie B, Sahmani S, Safaei B, Xu B. Nonlinear secondary resonance of FG porous silicon nanobeams under periodic hard excitations based on surface elasticity theory. *Engineering with Computers*: 2021;37:1611-34. doi: 10.1007/s00366-019-00931-w
- [5] Nuhu AA, Safaei B. State-of-the-art of vibration analysis of small-sized structures by using nonclassical continuum theories of elasticity. *Archives of Computational Methods in Engineering*: 2022;29(7):4959-5147. doi: 10.1007/s11831-022-09754-3
- [6] Jiang Y, Li L, Hu Y. A nonlocal surface-bulk interactions and its application to mechanics of nanobeams. *International Journal of Engineering Science*: 2022;172:103624. doi: 10.1016/j.ijengsci.2022.103624
- [7] El-Borgi S, Rajendran P, Trabelssi M. Nonlocal and surface effects on nonlinear vibration response of a graded Timoshenko nanobeam. *Archive of Applied Mechanics*: 2023;93(1):151-80. doi: 10.1007/s00419-022-02120-6
- [8] Wong EW, Sheehan PE, Lieber CM. Nanobeam mechanics: elasticity, strength, and toughness of nanorods and nanotubes. *science*: 1997;277(5334):1971-5. doi: 10.1126/science.277.5334.1971

- [9] Cuenot S, Frétiigny C, Demoustier-Champagne S, Nysten B. Surface tension effect on the mechanical properties of nanomaterials measured by atomic force microscopy. *Physical Review B*: 2004;69(16):165410. doi: [10.1103/PhysRevB.69.165410](https://doi.org/10.1103/PhysRevB.69.165410)
- [10] Jing G, Duan HL, Sun X, Zhang Z, Xu J, Li Y, et al. Surface effects on elastic properties of silver nanowires: contact atomic-force microscopy. *Physical review B*: 2006;73(23):235409. doi: [10.1103/PhysRevB.69.165410](https://doi.org/10.1103/PhysRevB.69.165410)
- [11] Babaei Gavan K, Westra HJ, van der Drift EW, Venstra WJ, van der Zant HS. Size-dependent effective Young's modulus of silicon nitride cantilevers. *Applied Physics Letters*: 2009;94(23). doi: [10.1063/1.3152772](https://doi.org/10.1063/1.3152772)
- [12] Nilsson S, Sarwe E-L, Montelius L. Fabrication and mechanical characterization of ultrashort nanocantilevers. *Applied physics letters*: 2003;83(5):990-2. doi: [10.1063/1.1592303](https://doi.org/10.1063/1.1592303)
- [13] Nilsson SG, Borrisse X, Montelius L. Size effect on Young's modulus of thin chromium cantilevers. *Applied physics letters*: 2004;85(16):3555-7. doi: [10.1063/1.1807945](https://doi.org/10.1063/1.1807945)
- [14] Wu B, Heidelberg A, Boland JJ, Sader JE, Sun, Li Y. Microstructure-hardened silver nanowires. *Nano letters*: 2006;6(3):468-72. doi: [10.1021/nl052427f](https://doi.org/10.1021/nl052427f)
- [15] Heidelberg A, Ngo LT, Wu B, Phillips MA, Sharma S, Kamins TI, et al. A generalized description of the elastic properties of nanowires. *Nano letters*: 2006;6(6):1101-6. doi: [10.1021/nl060028u](https://doi.org/10.1021/nl060028u)
- [16] Taghipour Y, Zeinali M. Functionally graded nanobeams subjected to large deflection by considering surface effects. *Scientia Iranica*. 2023. doi: [10.24200/SCI.2023.60997.7113](https://doi.org/10.24200/SCI.2023.60997.7113)
- [17] Søndergaard N, Ghatnekar-Nilsson S, Guhr T, Montelius L. Understanding mechanical properties of nanostructures using Euler's theory. *Nanotechnology*: 2007;18(25):255502. doi: [10.1088/0957-4484/18/25/255502](https://doi.org/10.1088/0957-4484/18/25/255502)
- [18] Gordon MJ, Baron T, Dhalluin F, Gentile P, Ferret P. Size effects in mechanical deformation and fracture of cantilevered silicon nanowires. *Nano letters*: 2009;9(2):525-9. doi: [10.1021/nl802556d](https://doi.org/10.1021/nl802556d)
- [19] Li X, Ono T, Wang Y, Esashi M. Ultrathin single-crystalline-silicon cantilever resonators: Fabrication technology and significant specimen size effect on Young's modulus. *Applied Physics Letters*: 2003;83(15):3081-3. doi: [10.1063/1.1618369](https://doi.org/10.1063/1.1618369)
- [20] Sapsathiarn Y, Rajapakse R. A model for large deflections of nanobeams and experimental comparison. *IEEE transactions on nanotechnology*: 2011;11(2):247-54. doi: [10.1109/TNANO.2011.2160457](https://doi.org/10.1109/TNANO.2011.2160457)
- [21] Taghipour Y, Baradaran GH. A finite element modeling for large deflection analysis of uniform and tapered nanowires with good interpretation of experimental results. *International Journal of Mechanical Sciences*: 2016;114:111-9. doi: [10.1016/j.ijmecsci.2016.05.006](https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2016.05.006)
- [22] Namazi N, Alitavoli M, Darvizeh A, Babaei H, Abdoli KF, Rajabiehfarid R. Experimental investigation and numerical modelling of dynamic compaction process of pure iron powder with ceramic particles. 2016. [In Persian]
- [23] Alinaghi K, Golabi Si. Minimizing piston mass of Neuman Esser reciprocating compressors using genetic algorithm. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2021;8(5):30-42. [In Persian]
- [24] Mashayekhi A, Imanian E, Modanloo V, Akhoundi B. Using the artificial bee colony optimization, crow, and genetic algorithm for identifying and optimizing the dynamic parameters of a haptic device and operator's hand. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2023. doi: [10.22034/IJME.2023.389048.1758](https://doi.org/10.22034/IJME.2023.389048.1758) [In Persian]
- [25] Mashayekhi A, Mashayekhi M, Siciliano B. Identification and optimization of the operator's hand and a haptic device dynamic, using artificial intelligence methods. *International Journal of Dynamics and Control*: 2023:1-10. doi: [10.1007/s40435-023-01165-x](https://doi.org/10.1007/s40435-023-01165-x)
- [26] Mohamadzadeh Moghaddam MS, Modabberifar M, Mirzakhani B. Design of a new actuator for actuating a linear hydraulic valve and its optimization with genetic algorithm. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*: 2017;4(1):1-9. [In Persian]
- [27] Taghipour Y, Darfarin S. A Method for Comparison of Large Deflection in Beams. *International Journal of Applied Mechanics and Engineering*: 2022;27(4):179-93. doi: [10.2478/ijame-2022-0058](https://doi.org/10.2478/ijame-2022-0058)
- [28] Felippa CA. Nonlinear finite element methods. Aerospace Engineering Sciences Department of the University of Colorado Boulder. 2001.
- [29] Karaboga D. An idea based on honey bee swarm for numerical optimization. Technical report-tr06, Erciyes university, engineering faculty, computer. 2005.