



شبیه‌سازی تماس باکتری‌های نرم جهت کاربرد در نانومنیپولیشن

محرم حبیب نژاد کورایم^{1*}، حسام خاکسار²، روزبه نوحی حفظ آباد³، معین طاهری⁴

1- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت، تهران

2- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت، تهران

3- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت، تهران

4- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت، تهران

* تهران، 16846-13114، hkorayem@iust.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 27 فروردین 1393

پذیرش: 02 تیر 1393

ارائه در سایت: 23 مهر 1393

کلید واژگان:

منیپولیشن

تئوری‌های مکانیک تماسی الاستیک - پلاستیک

نانوباکتری‌های نرم

میکروسکوپ نیروی اتمی

تئوری الاستیک - پلاستیک چانگ

در این مقاله به توسعه و مدل‌سازی تئوری‌های تماسی الاستیک - پلاستیک جهت نانوباکتری‌های نرم کروی شکل به منظور کاربرد در منیپولیشن میکرو/نانوذرات زیستی مختلف بر پایه‌ی میکروسکوپ نیروی اتمی پرداخته شده است. ابتدا به شبیه‌سازی تماس الاستیک برای سه دسته نانوباکتری اپیدرمیدیس، سالی‌ویروس و آئروس با استفاده از مدل تماسی هرتز و المان محدود پرداخته شد. مقایسه نتایج شبیه‌سازی تماس الاستیک با نتایج آزمایشگاهی موجود نشان داد که در نظر گرفتن حالت الاستیک برای شبیه‌سازی تماس نانوذرات زیستی مناسب نیست و نتایج نادرستی را در اختیار قرار می‌دهد. از این‌رو در این مطالعه به توسعه و شبیه‌سازی تئوری تماسی الاستیک - پلاستیک چانگ جهت کاربرد در شبیه‌سازی مکانیک تماس به منظور کاربرد در شبیه‌سازی منیپولیشن پرداخته شد. مقایسه شبیه‌سازی تئوری تماسی چانگ با نتایج آزمایشگاهی موجود و نتایج حاصل از شبیه‌سازی تماسی چن و همکارانش نشان داد که تئوری الاستیک - پلاستیک کامل چانگ نتایج مطلوبی را در اختیار قرار می‌دهد. مقایسه نمودار شعاع تماس برحسب عمق نفوذ در دو تئوری هرتز و چانگ نشان داد که میزان شعاع تماسی ایجاد شده در حالت الاستیک - پلاستیک از میزان شعاع تماسی ایجادشده در حالت الاستیک بیشتر می‌باشد.

Simulation of soft bacteria contact to be applied in nanomanipulation

Moharam Habibnejad Korayem^{1*}, Hesam Khaksar², Rouzbeh Nouhi Hefz Abad³, Moin Taheri⁴

1- Department of Mechanical Engineering, Iran University and Science Technology, Tehran, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Iran University and Science Technology, Tehran, Iran

3- Department of Mechanical Engineering, Iran University and Science Technology, Tehran, Iran

4- Department of Mechanical Engineering, Iran University and Science Technology, Tehran, Iran

* P.O.B. 16846-13114, Tehran, Iran, hkorayem@iust.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 16 April 2014

Accepted 23 June 2014

Available Online 15 October 2014

Keywords:

Manipulation

Elastic-plastic contact theories

Soft nanobacteria

Atomic force microscopy

Chang elastic-plastic contact theory

ABSTRACT

In this paper, elastic-plastic contact theories for soft spherical nanobacteria based on atomic force microscopy were developed and modeled to be applied in manipulation of various macro/nanobio particles. First, elastic contact was simulated for three types of nanobacteria: *S. epidermidis*, *S. salivarius* and *S. aureus*, using Hertz contact model and finite element. Comparing simulation results of elastic contact with experimental data showed that considering elastic contact for simulating the contact of nanobio particles is not appropriate and will yield incorrect results. Therefore, in this research, an attempt was made to develop and simulate Chang elastic-plastic contact theory to be applied in simulation of contact mechanics for application in simulating manipulation. Comparing simulation of Chang contact theory with available experimental data and the results from contact simulation of Chen et al showed that Chang's complete elastic-plastic theory yields desirable results. Comparing the diagram of contact radius in terms of indentation in Hertz and Chang theories showed that the created contact radius in elastic-plastic state is larger than contact radius in elastic state.

1- مقدمه

و مدل‌های مکانیک تماسی پیوسته را در مقیاس نانو بررسی کردند [1]. دندان‌ها گذاری یکی از تکنیک‌هایی است که برای اندازه‌گیری خواص مکانیکی نانوذرات بکار می‌رود، از این‌رو داتی‌نبی و کورایم عمق دندان‌گذاری نانوذرات کروی در منیپولیشن را بر اساس میکروسکوپ نیروی اتمی با استفاده از مدل‌های مکانیک تماس مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها پس از تحلیل سینماتیک سیستم، عمق فرورفتگی و شعاع تماسی نانوذره را در اثر تماس با کانتیلور و سطح‌مینا با استفاده از مدل‌های نانومکانیک تماس شبیه‌سازی کردند [2]. یکی از مدل‌های

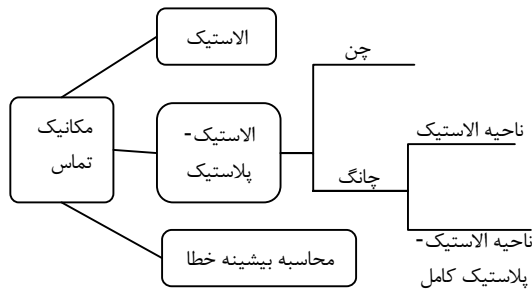
مکانیک تماس از مهمترین و تأثیرگذارترین پارامترها در انجام فرایند منیپولیشن بر پایه میکروسکوپ نیروی اتمی است. علاوه بر مکانیک تماس پارامترهای هندسی و محیطی زیاد دیگری چون جنس سطح‌مینا نیز بر کیفیت این فرایند تأثیرگذار می‌باشند. به همین دلیل شبیه‌سازی تماس و منیپولیشن میکرو/نانوذرات در دهه اخیر رشد چشمگیری را پیدا کرده است. سیتی و همکارانش سیستم لمسی تله اپراتوری ابعاد نانو را پیشنهاد کردند

Please cite this article using:

M. Habibnejad Korayem, H. Khaksar, R. Nouhi Hefz Abad, M. Taheri, Simulation of soft bacteria contact to be applied in nanomanipulation, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 14, pp. 227-234, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

M. Habibnejad Korayem, H. Khaksar, R. Nouhi Hefz Abad, M. Taheri, Simulation of soft bacteria contact to be applied in nanomanipulation, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 14, pp. 227-234, 2015 (In Persian)



شکل 1 فلوچارت کلی تحقیق

گلادیلین و همکارانش کشش تک محوره‌ی سلول را با تحلیل المان محدود سه بعدی مورد بررسی قرار دادند [13]. وایت نشان داد که محدوده برداری قیچی نوری³ می‌تواند برای محاسبه راندمان به‌دام‌اندازی نوری⁴ برای اجسام دی‌الکتریک با شکل نامشخص استفاده شود [14]. حمید لدجال و همکارانش دندانه‌گذاری سلول را با نرم‌افزار المان محدود مدل نموده و نتایج را با مدل تماسی هرتز مورد مقایسه قرار دادند [15].

با توجه به آنچه از فعالیت‌های انجام‌شده توسط محققین گفته شد، این‌گونه استدلال می‌شود که عمده‌ی بررسی‌ها در زمینه‌ی منیپولیشن میکرو/نانو ذرات تا به امروز مربوط به شبیه‌سازی تماس و منیپولیشن ذرات کروی در حالت الاستیک بوده است. به همین دلیل در این مقاله به شناسایی و توسعه مدل تماسی الاستیک - پلاستیک جهت بررسی مکانیک تماس برای منیپولیشن بر پایه میکروسکوپ نیروی اتمی پرداخته شده است. نتایج تماس الاستیک - پلاستیک در کنار نتایج تماس الاستیک آورده شده است تا اختلاف آن‌ها مشخص شود. به منظور تأیید نتایج حالت الاستیک، شبیه‌سازی المان محدود صورت گرفت.

2- تئوری‌های تماسی تحت بررسی

شکل 1 نمای کلی از تئوری‌های تماسی استفاده شده در این مقاله را نشان می‌دهد.

2-1-1- تئوری الاستیک - پلاستیک کامل چانگ

چانگ و همکارانش یک تئوری چند مرحله‌ای را جهت شبیه‌سازی تماس با عمق نفوذ بالا و در حالت الاستیک - پلاستیک کامل ارائه کردند [16]. پارامتر اساسی و تأثیرگذار این گروه مقدار عمق نفوذ بحرانی می‌باشد. عمق نفوذ بحرانی از رابطه شماره (1) حاصل می‌گردد.

$$\delta_c = (\pi MH / 2K)^{2/3} R \quad (1)$$

2-1-1-1- مرحله الاستیک

این مرحله از تئوری چانگ با تئوری هرتز مطابقت می‌کند. رابطه شماره (2) رابطه نیرو برحسب عمق نفوذ و رابطه شماره (3) رابطه سطح تماس برحسب عمق نفوذ را نشان می‌دهد.

$$\frac{\delta}{\delta_c} < 1 \quad (2)$$

$$P = KR^{1/2} \delta^{1/2} = P_c \left(\frac{\delta}{\delta_c} \right)^{3/2} \quad (3)$$

$$A = \pi R \delta = A_c \left(\frac{\delta}{\delta_c} \right) \quad (3)$$

2-1-2- مرحله شروع تغییر شکل پلاستیک

هنگامی که میزان عمق نفوذ با عمق نفوذ بحرانی برابر می‌شود، مرحله تغییر شکل پلاستیک آغاز می‌گردد.

مکانیک تماس که نیروی کوتاه برد چسبندگی را در نظر می‌گیرد مدل جی‌کی آر¹ است، کورایم و همکارانش مکانیک تماس همراه با چسبندگی را بررسی کردند، آن‌ها نتیجه گرفتند که استفاده از تئوری تماسی جی‌کی‌آر نتایج مطلوب‌تری را در مورد ذرات زیستی ارائه می‌دهد [3]. در همین رابطه چو و همکارانش تئوری تماسی جی‌کی‌آر را برای سلول‌های زنده بررسی نمودند. آن‌ها بیان کردند که این تئوری یک مدل دقیق برای انرژی چسبندگی قوی برای مواد نرم و تغییر شکل‌پذیر است [4]. کورایم و طاهری به بررسی تمامی حالات تماسی ذرات کروی شکل در حالت الاستیک پرداختند [5]. با توجه به هندسه‌های موجود از ذرات زیستی، کورایم و همکارانش در مطالعه‌ای دیگر، به بررسی تماس میکرو/نانو ذرات استوانه‌ای و استوانه‌ای پخ خورده پرداختند، آن‌ها در این بررسی نتیجه گرفتند که عمق نفوذ ذرات به شکل استوانه پخ خورده از عمق نفوذ ذرات کروی کمتر و از عمق نفوذ ذرات استوانه‌ای شکل بیشتر می‌باشد [6]. یکی از کاربردهای اساسی میکروسکوپ نیروی اتمی شناسایی خواص میکرو / نانوذرات زیستی می‌باشد. باستاتاس و همکارانش به بررسی سه سلول سرطانی مختلف غدد لنفاوی متاستاز پایین، سی-ال 1 و سی-ال 2 متاستاز بالا پرداختند. این گروه با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی خواص مکانیکی و چسبندگی این سه سلول را محاسبه کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که مدول الاستیسیته و توانایی مهاجرت در سی-ال 1 و سی-ال 2 از غدد لنفاوی بیشتر است. همچنین آن‌ها نشان دادند که سی-ال 1 و سی-ال 2 به طور قابل توجهی یک ناحیه بزرگ‌تر از چسبندگی سلول به سطح را دارند، این در حالی است که سلول غدد لنفاوی یک چسبندگی محدود را از خود نشان می‌دهد. این خواص اندکی در سی-ال 2 در مقایسه با سلول‌های سی-ال 1 کمتر است [7].

جیروت و همکارانش با استفاده از بيو میکروسکوپ نیروی اتمی که خود یک نوع میکروسکوپ نیروی اتمی هیبریدی می‌باشد، خواص سلول بیولوژیکی ای‌پی‌اچ² را به دست آوردند [8].

ذرات انتخاب شده جهت شبیه‌سازی در این مقاله از دسته‌ی باکتری‌ها می‌باشد. باکتری‌ها می‌توانند به شکل میله‌ای و یا کروی باشند ولی ساختار همگن ندارند. با توجه به نقش انواع باکتری‌ها در بیماری‌های مختلف، استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی در شناسایی خواص این سلول‌ها و جابجایی آن‌ها اهمیت دوچندان پیدا کرده است.

مطالعات گسترده‌ای بر روی باکتری‌ها انجام شده است، راوال و همکارانش به بررسی خواص مختلف نانوباکتری‌ها پرداختند [9]. یائو و همکارانش با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی خواص باکتری‌های زیست پذیر را به‌وسیله ته‌نشین کردن آن‌ها بر روی یک فیلتر آلومینیومی، محاسبه کردند [10]. یاماشیتا و همکارانش به تصویربرداری از سطح سلول باکتری زنده با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی سرعت‌بالا پرداختند [11]. بیچ و همکارانش کاربرد میکروسکوپ نیروی اتمی جهت بررسی ارتباط بیوفیلیم باکتریال و سطح را مورد مطالعه قرار دادند [12].

با توجه به افزایش ظرفیت‌های محاسباتی و ورود المان محدود به حوزه‌های مختلف در سال‌های اخیر، المان محدود به ابزاری کاربردی تبدیل شده و در حال حاضر این روش کاربرد وسیعی در زمینه بیولوژیک یافته است. ازجمله مطالعات انجام‌شده در این زمینه می‌توان به بررسی بارهای وارده بر روی عضلات و اندام‌های بدن تا سلول‌های مورد آزمایش در محیط‌های آزمایشگاهی و داخل بدن موجود زنده توسعه‌یافته است.

3- Optical tweezers
4- Optical trapping

1- JKR
2- EPH

اچ بی - سی 12⁹ از دسته سالی‌ویروس، دو گونه‌ی مرتبط به هم‌اند که در میزان اضافات سطحی رشته‌ای با یکدیگر تفاوت دارند. باکتری ان سی تی سی 4-8325¹⁰ از دسته آئروس انتخاب گردید. نمونه‌های انتخابی به مدت 40 ساعت در دمای 37 درجه سانتی‌گراد و در خون رشد داده شد. تصویربرداری در محیط هوا و در دمای محیط انجام شد. چن و همکارانش برای تصویربرداری از میکروسکوپ نیروی اتمی مدل بروکر¹¹ و کانتیلور نوع ان پی او 10¹² استفاده کردند [17].

شکل 2 ساختار باکتری‌های تحت بررسی را نشان می‌دهد. باکتری‌های یاد شده شامل یک سیتوپلاسم، ماده‌ی درون یاخته‌ای شامل یک هسته‌ی سخت پوشیده شده از یک لیبید دولایه¹³ یا غشای پوشیده شده از یک لایه ضخیم و نسبتاً صلب و لایه خارجی شامل اضافات سطحی پروتئین‌دار با قطرها و طول‌های متفاوت می‌باشد. در این نوع باکتری‌ها توزیع تنش همگن نیز در بارگذاری خارجی وجود ندارد، و لایه‌ی خارجی نرم‌تر ممکن است با تمرکز تنش به سوی لایه‌های صلب و سخت هسته تغییر شکل یابد [17].

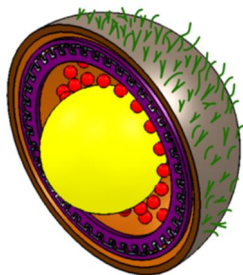
4- شبیه‌سازی تماس

در این قسمت از این مقاله به شبیه‌سازی تماس 5 باکتری معرفی شده بر روی سطح شیشه پرداخته می‌شود. جدول 1 خصوصیات مکانیکی این 5 نوع باکتری را نشان می‌دهد.

نوک سوزن میکروسکوپ نیروی اتمی در این شبیه‌سازی به صورت کروی از جنس سیلیکون و با شعاع 50 نانومتر انتخاب شد. جهت صحت سنجی روابط ارائه شده بخش 2 نتایج شبیه‌سازی‌ها با نتایج نمونه‌های آزمایشگاهی چن و همکارانش [17] مقایسه شده است.

4-1- شبیه‌سازی تماس الاستیک

در این قسمت به شبیه‌سازی تماس الاستیک 5 نوع باکتری مختلف با استفاده از مدل تماسی هرتز و روش المان محدود پرداخته می‌شود. از آن‌جا که مدل تماسی هرتز یک مدل با تغییر شکل کوچک به حساب می‌آید میزان نیروی وارده بر نوک سوزن میکروسکوپ نیروی اتمی را در شبیه‌سازی‌ها کاهش داده تا مدل تماسی هرتز پاسخ مناسب‌تری را در اختیار قرار دهد.



شکل 2 ساختار باکتری‌های تحت بررسی

جدول 1 خصوصیات باکتری‌های تحت بررسی [17]

نام باکتری	مدول الاستیسته مؤثر (کیلو پاسکال)	شعاع (نانومتر)
ای تی سی سی 35983	7190	500
ای تی سی سی 35984	510	500
اچ بی - سی 12	1320	500
اچ بی - 7	593	500
ان سی تی سی 4-8325	5472	500

9- HB-C12
10- NCTC 8325-4
11- Bruker
12- NP-O10
13- lipid bilayer

$$\frac{\delta}{\delta_c} = 1$$

مرحله شروع تغییر شکل پلاستیک

2-1-3- مرحله الاستیک - پلاستیک کامل

تماس در این مرحله با توجه به نسبت عمق نفوذ به عمق نفوذ بحرانی به دو بخش تقسیم می‌شود. اگر میزان نسبت عمق نفوذ به عمق نفوذ بحرانی بین 1 تا 6 باشد، روابط شماره (4) و (5) به ترتیب روابط میان نیرو - عمق نفوذ و سطح تماس - عمق نفوذ را در این ناحیه نشان می‌دهد:

$$\frac{P}{P_c} = 1.03 \left(\frac{\delta}{\delta_c} \right)^{1.425}, 1 < \frac{\delta}{\delta_c} < 6 \quad (4)$$

$$\frac{A}{A_c} = 0.93 \left(\frac{\delta}{\delta_c} \right)^{1.136}, 1 < \frac{\delta}{\delta_c} < 6 \quad (5)$$

در صورتی که میزان عمق نفوذ ایجاد شده از 6 برابر عمق نفوذ بحرانی بیشتر باشد، تماس وارد مرحله جدیدی می‌شود. رابطه شماره (6) رابطه نیرو بر حسب عمق نفوذ و رابطه شماره (7) رابطه سطح تماس بر حسب عمق نفوذ را نشان می‌دهد.

$$\frac{P}{P_c} = 1.4 \left(\frac{\delta}{\delta_c} \right)^{1.236}, 6 < \frac{\delta}{\delta_c} < 110 \quad (6)$$

$$\frac{A}{A_c} = 0.94 \left(\frac{\delta}{\delta_c} \right)^{1.146}, 6 < \frac{\delta}{\delta_c} < 110 \quad (7)$$

2-2- مدل تماسی چن و همکاران

چن و همکارانش با در نظر گرفتن یک استوانه در ناحیه تماس یک رابطه جدید جهت شبیه‌سازی مکانیک تماس مواد نرم ارائه کردند. رابطه شماره (8) نیروی تماسی چن و همکارانش را بر حسب میزان طول استوانه تماس و عمق نفوذ نشان می‌دهد [17].

$$P = \pi R K \frac{h_0 \delta}{h_0 - \delta} \quad (8)$$

2-3- تئوری الاستیک هرتز

از جمله اولین مطالعات انجام شده بر روی مکانیک تماس توسط هرتز انجام شد. مدل تماسی او تنها تماس یک کره و سطح صاف را در حالت الاستیک و بدون در نظر گرفتن چسبندگی بیان می‌کند. از آن‌جا که مدل تماسی هرتز نیروهای چسبندگی و سطحی را شامل نمی‌شود، در صورت وجود نیروهای سطحی این مدل تماسی برای بارگذاری‌های کم و عمق نفوذ اندک، پاسخ مناسبی را ارائه نمی‌کند [18]. رابطه‌ی بین شعاع تماس و نیروی بارگذاری در این مدل به صورت رابطه شماره (9) می‌باشد. همچنین رابطه‌ی بین عمق نفوذ و نیروی بارگذاری در تئوری هرتز به صورت رابطه شماره (10) می‌باشد.

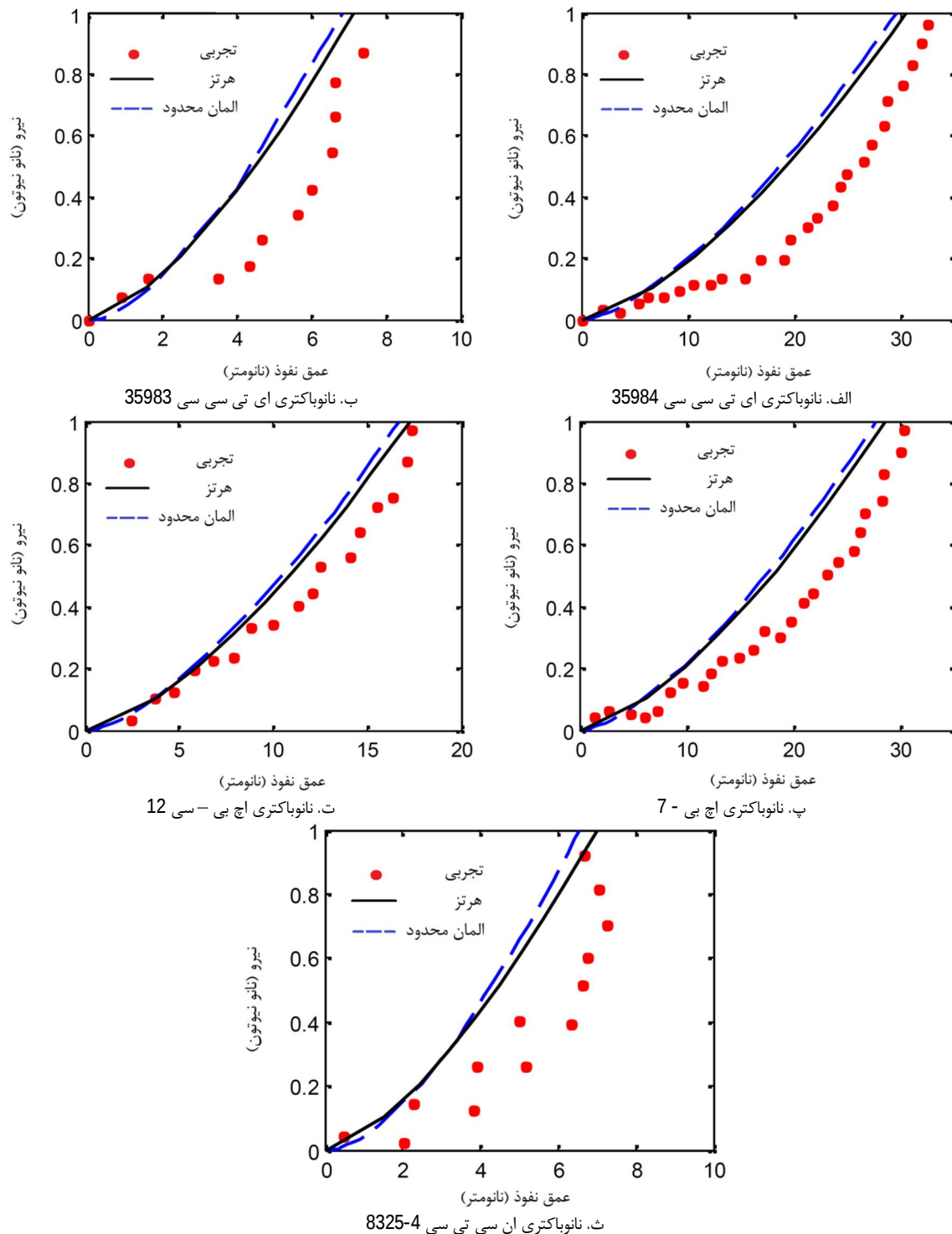
$$A_{\text{Hertz}} = \left(\frac{PR}{K} \right)^{1/3} \quad (9)$$

$$\delta_{\text{Hertz}} = \frac{A_{\text{Hertz}}^2}{R} \quad (10)$$

3- ذرات مورد استفاده

باکتری‌های انتخاب شده جهت شبیه‌سازی در این مطالعه به سه دسته باکتری اپیدرمیدیس¹، سالی ویروس² و آئروس³ با خواص سطحی گوناگون تقسیم می‌شود. دو نوع باکتری ای تی سی سی 35983⁴ و ای تی سی سی 35984⁵ از دسته اپیدرمیدیس به ترتیب به عنوان مولد ضعیف و قوی مواد پلیمریک خارج سلولی⁶ ای پی اس⁷ شناخته می‌شوند. دو نوع باکتری اچ بی - 7⁸ و

1-S. epidermidis
2- S. salivarius
3- S. aureus
4- ATCC 35983
5- ATCC 35984
6- Extracellular polymeric substances
7- EPS
8- HB-7



شکل 3 تغییرات نیرو برحسب عمق نفوذ برای 5 نانوباکتری مختلف در حالت الاستیک

جواب‌های نسبتاً ناصحیحی را ارائه می‌کند. این شکل شامل سه دسته منحنی از داده‌های تجربی، المان محدود و هرتز است. از آنجا که نیروی اعمالی کم در نظر گرفته شده است شبیه‌سازی المان محدود و مدل تماسی هرتز شباهت زیادی به یکدیگر پیدا کرده‌اند، که این امر خود نشان دهنده صحت شبیه‌سازی‌های الاستیک نیز می‌باشد. با توجه به خواص مکانیکی مختلف نانوباکتری‌های گوناگون میزان عمق نفوذ این نانوباکتری‌ها به ازای اعمال یک نیروی یکسان متفاوت می‌باشد. نانوذرات نرم‌تر، عمق نفوذ بیشتر و نانوذرات سخت‌تر عمق نفوذ کمتری را از خود بروز می‌دهند.

شبیه‌سازی المان محدود با استفاده از نرم‌افزار آباکوس¹ انجام شده و فرضیات زیر در مدل‌سازی المان محدود لحاظ شده است:

- 1- مسئله متقارن محوری است.
- 2- رفتار سوزن میکروسکوپ نیروی اتمی الاستیک است.
- 3- سلول هموژن و تراکم ناپذیر است.

شکل 3 نمودار نیرو برحسب جابجایی را برای تماس به شکل الاستیک نشان می‌دهد. همانطور که از نمودار پیداست در نظر گرفتن حالت الاستیک

1- ABAQUS

2-4- شبیه‌سازی تماس الاستیک - پلاستیک (نیرو برحسب عمق نفوذ)

در این قسمت با استفاده از تئوری‌های چانگ و چن به شبیه‌سازی تماس نانوباکتری‌های نرم پرداخته می‌شود.

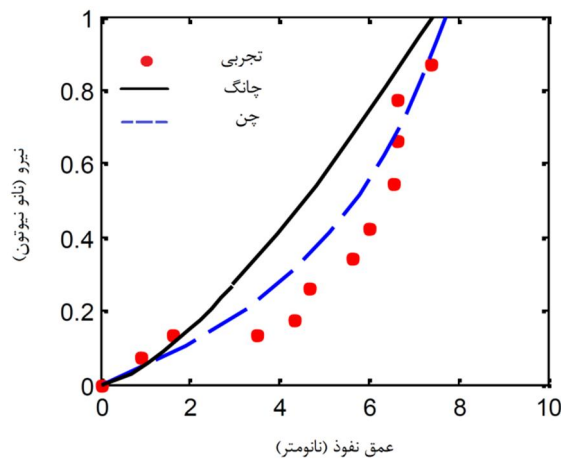
شکل 4 نمودار نیرو برحسب عمق نفوذ مدل‌های تماسی چانگ و چن را در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد. با مشاهده‌ی شکل 4 و مقایسه‌ی آن با شکل 3 می‌توان دریافت که مدل تماسی چن در مقایسه با مدل تماسی چانگ نتایج بهتری را در اختیار قرار می‌دهد. همچنین، هر چه ذرات نرم‌تر باشند، میزان عمق نفوذ ایجادشده افزایش می‌یابد.

3-4- شبیه‌سازی تماس الاستیک در مقایسه با شبیه‌سازی تماس

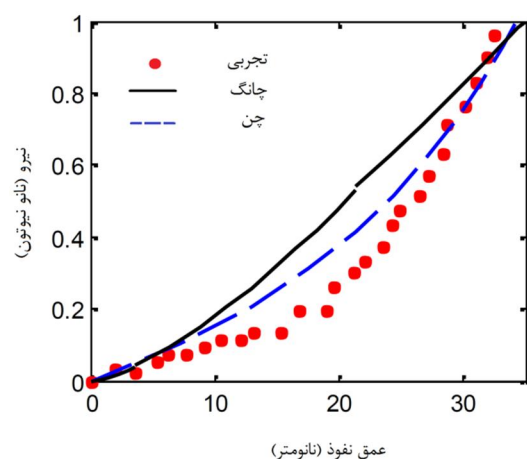
الاستیک - پلاستیک

در این بخش به مقایسه دو تماس الاستیک و الاستیک - پلاستیک با یکدیگر پرداخته می‌شود.

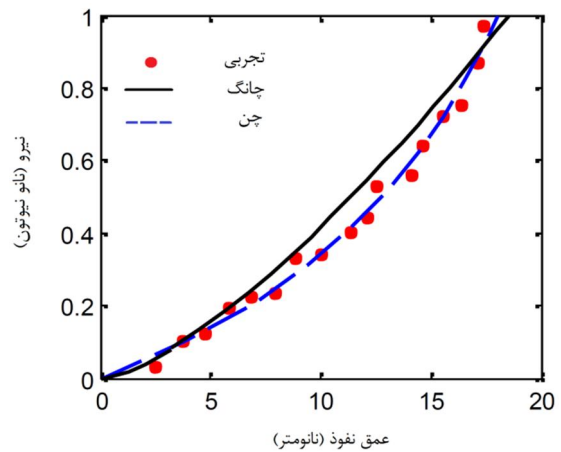
شکل 5 نمودار عمق نفوذ برحسب شعاع تماس را برای دو تئوری تماسی هرترز و چانگ در مقایسه با یکدیگر نشان می‌دهد. از آنجا که تئوری چانگ پس از مرحله الاستیک مراحل الاستو - پلاستیک را نیز در نظر می‌گیرد، ناحیه تماسی این مدل از مدل تماسی هرترز بیشتر می‌باشد.



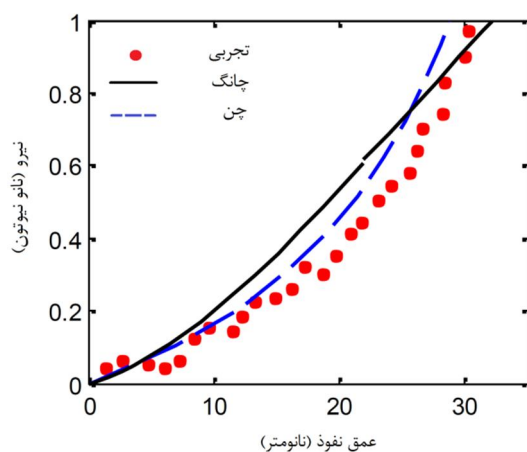
ب. نانوباکتری ای تی سی سی 35983



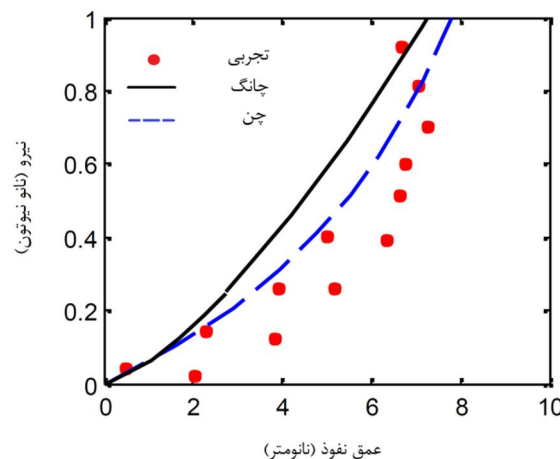
الف. نانوباکتری ای تی سی سی 35984



ت. نانوباکتری ای تی سی سی 12

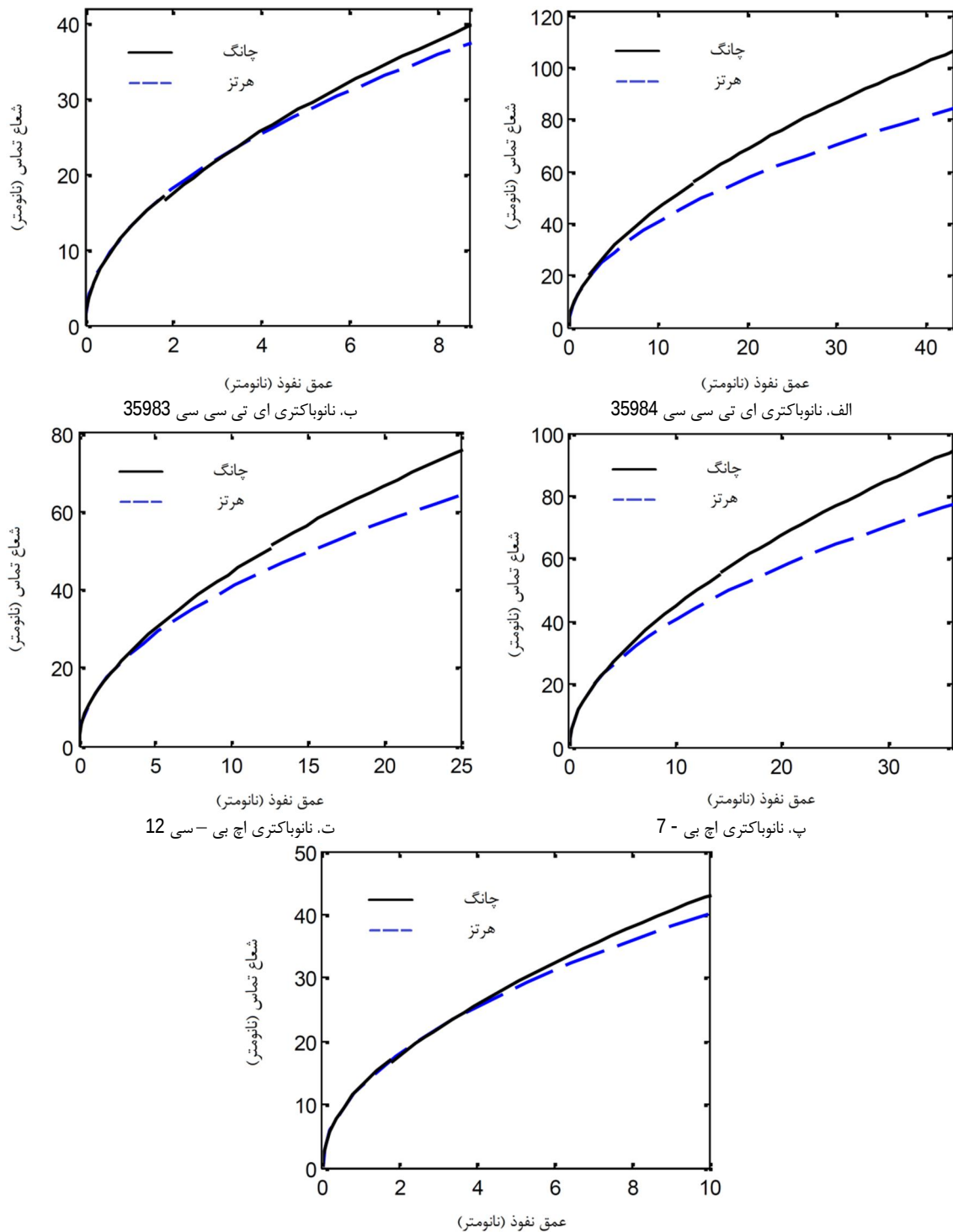


پ. نانوباکتری ای تی سی سی 7



ث. نانوباکتری ان تی سی سی 8325-4

شکل 4 تغییرات نیرو برحسب عمق نفوذ برای 5 نانوباکتری مختلف در حالت الاستیک - پلاستیک



شکل 5 تغییرات شعاع تماس برحسب عمق نفوذ مدل‌های تماسی چانگ و هرتز در مقایسه با یکدیگر برای 5 نانوباکتری مختلف

نیروی اتمی ایفا می‌کند.

علاوه بر مکانیک تماس پارامترهای هندسی و محیطی زیاد دیگری چون جنس سطح‌مبنا نیز بر کیفیت این فرآیند تأثیرگذار می‌باشند. محاسبه نیرو و زمان بحرانی در منیپولیشن میکرو/نانو ذرات به شدت وابسته به میزان عمق نفوذ و شعاع تماسی می‌باشد که محاسبه‌ی آن برعهده‌ی مکانیک تماس است. در این مقاله به‌منظور بررسی مکانیک تماس به شبیه‌سازی عمق نفوذ و شعاع تماس میکرو/نانوذرات کروی پرداخته شده است. از آن‌جا که عمده فعالیت‌های انجام‌شده در این حوزه تنها حالت

5- بررسی خطا

در این قسمت به بررسی خطای دو تئوری هرتز و چانگ پرداخته می‌شود. به منظور بررسی بهتر در هر دو تئوری بیشینه خطای هر حالت نسبت به نتایج آزمایشگاهی محاسبه شد. شکل 6 نمودار خطا برای دو تئوری تماسی هرتز و چانگ را نسبت به نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد.

6- بحث و جمع‌بندی

مکانیک تماس نقش مهمی را در انجام فرایند منیپولیشن بر پایه میکروسکوپ

7- فهرست علائم

A	سطح تماس
A_c	سطح تماس بحرانی
h_0	طول استوانه تماس در مدل تماسی چن
H	سختی کره وابسته به تنش تسلیم
K	مدول الاستیسته مؤثر
M	ضریب سختی و وابسته به ضریب پواسون
P	نیروی تماسی
P_c	نیروی تماسی بحرانی
R	شعاع ذرات کروی

علائم یونانی

δ	عمق نفوذ
δ_c	عمق نفوذ بحرانی

زیرنویس‌ها

Hertz هرتز

8- مراجع

- [1] M. Sitti, H. Hashimoto, Teleoperated Touch Feedback From the Surfaces at the Nanoscale Modeling and Experiments, *ASME TRANSACTIONS ON MECHATRONICS*, Vol. 8, No. 2, pp. 287-298, 2003.
- [2] K. Daeinabi, M. H. Korayem, Indentation analysis of nano-particle using nano-contact mechanics models during nano-manipulation based on atomic force microscopy, *J Nanopart Res*, Vol.13, No. 3, pp. 1075-1091, 2011.
- [3] M. H. Korayem, Z. Rastegar, M. Taheri, Application of Johnson- Kendall-Robert model in nano-manipulation of biological cell: air and liquid environment, *Micro & Nano letters*, Vol. 7, pp. 576-580, 2012.
- [4] Y. Chu, S. Dufour, J. P. Thiery, E. Perez and F. Pincet, Johnson-Kendall-Roberts theory applied to living cells, *Journal of Nanomedicine*, Vol. 6, pp. 523-529, 2003.
- [5] M. H. Korayem, M. Taheri, Modeling of various contact theories for the manipulation of different biological micro/nanoparticles based on AFM, *Journal of Nanoparticle Research*, Vol. 16, No. 1, pp. 1-18, 2014.
- [6] M. H. Korayem, H. Khaksar, M. Taheri, Modeling of contact theories for the manipulation of biological micro/nanoparticles in the form of circular crowned rollers based on the atomic force microscope, *JOURNAL OF APPLIED PHYSICS*, vol. 114, pp. 1- 13, 2013.
- [7] L. Bastatas, M. D. Marin, J. Matthews, J. Matthews, J. Y. Lee, S. Sennoune, S. Filleur, M. R. Zaguilan, S. Park, S. AFM nano- mechanics and calcium dynamics of prostate cancer cells with distinct metastatic potentia, *Biochimica et Biophysica Acta*, Vol.1820, pp.1111-1120, 2012.
- [8] M. Girot, M. Boukallel, S. R'egnier, Modeling Soft Contact Mechanism of Biological Cells Using an Atomic Force Bio-Microscope, *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1831-1836, 2006.
- [9] D. Rawal, Bh and, A.M.Pretorius, Nanobacterium sanguineum – Is it a new life-form in search of human ailment or commensal: Overview of its transmissibility and chemical means of intervention, *Medical Hypotheses*, Vol. 65, pp. 1062-1066, 2005.
- [10] X. Yao, J. Walter, S. Burke, S. Stewart, M. H. Jericho, K. D. Pink, R. Hunter, T. J. Beveridge, T.J., Atomic force microscopy and theoretical considerations of surface properties and turgor pressures of Bacteria, *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, Vol. 23, pp. 213-230, 2002.
- [11] H. Yamashita, A. Taoka, T. Uchihashi, T. Asano, T. Ando, Y. Fukumori, Single-Molecule Imaging on Living Bacterial Cell Surface by High-Speed AFM, *Journal of Molecular Biology*, Vol. 422, pp. 300-309, 2012.
- [12] I. B. Beech, J. R. Smith, A. A. Steele, I. Penegar, S. A. Campbell, The use of atomic force microscopy for studying interactions of bacterial biofilms with surfaces, *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, Vol. 23, pp. 231-247, 2002.
- [13] E. Gladiin, A. Micoulet, B. Hosseini, K. Rohr, J. Spatz and R. Eils, 3D finite element analysis of uniaxial cell stretching: from image to insight, *Phys. Biol*, Vol. 4, pp. 104-113, 2007.
- [14] D. A. White, Vector finite element modeling of optical tweezers, *Computer Physics Communications*, Vol. 128, pp. 558-564.
- [15] H. Ladjal, J. L. Hanus, A. Pillariseti, C. Keefer and A. Ferreira, Reality-Based Real-Time Cell Indentation Simulator, *IEEE/ASME TRANSACTIONS ON MECHATRONICS*, Vol. 17, pp. 239-250, 2012.

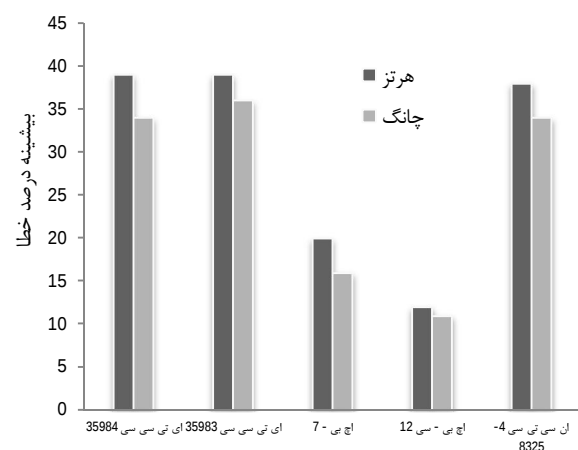
الاستیک را در بررسی مکانیک تماس میکرو/نانوذرات شامل می‌شود، در این مقاله تئوری تماسی الاستیک- پلاستیک کامل چانگ جهت شبیه‌سازی مکانیک تماس میکرو/نانوذرات نرم توسعه داده شد و مورد استفاده قرار گرفت، بنابراین نوآوری این مقاله مربوط به معرفی و به کارگیری تئوری تماسی الاستیک- پلاستیک جهت شبیه‌سازی مکانیک تماس و جایگزین کردن تئوری‌های الاستیک-پلاستیک به جای تئوری‌های رایج و نامناسب الاستیک در منیپولیشن ذرات زیستی می‌باشد.

نانوذرات انتخاب شده جهت شبیه‌سازی در این مقاله 5 نوع باکتری مختلف از سه دسته گوناگون اپیدرمیدیس، سالی‌ویروس و آئروس انتخاب شد. در مرحله اول به مانند اغلب کارهای پیشین شبیه‌سازی تماس به صورت الاستیک انجام شد، نمودار خطا نشان داد، که استفاده از حالت الاستیک جهت شبیه‌سازی تماس به منظور استفاده در منیپولیشن میکرو/نانوذرات صحیح نمی‌باشد. شبیه‌سازی المان محدود نیز صحتی بر این نتایج گذاشت.

از این رو در این مقاله به منظور برطرف کردن این نقص به توسعه و مدل‌سازی تماس الاستیک - پلاستیک پرداخته شد. مقایسه نتایج شبیه‌سازی دو مدل تماسی چانگ و چن با نتایج آزمایشگاهی موجود نشان داد که در نظر گرفتن حالت الاستیک - پلاستیک جواب‌های بسیار قابل قبولی را در اختیار قرار می‌دهد. مدل تماسی چن نتایج به نسبت بهتری را نسبت به مدل تماسی چانگ از خود نشان داد، اما باید این نکته را در نظر گرفت که محاسبه میزان طول استوانه تماس همواره ساده نبوده و محدودیت‌های زیادی را ایجاد می‌کند. به همین دلیل مدل چانگ عمومیت بیشتری داشته و در غالب اوقات به سادگی می‌توان از آن بهره برد.

همان‌گونه که پیش‌تر نیز اشاره شد، یکی از پارامترهای مؤثر در تماس محاسبه شعاع تماسی است. مقایسه شعاع تماسی دو حالت الاستیک و الاستیک - پلاستیک از این موضوع پرده برداشت که میزان شعاع تماسی در حالت الاستیک - پلاستیک بیشتر از حالت الاستیک است.

با توجه به رفتار ذرات در طی تماس و آنچه که از شکل‌های حاصل از شبیه‌سازی‌ها برداشت می‌شود می‌توان چنین نتیجه گرفت که در مواد زیستی با مدول الاستیسته‌ی پایین و با تغییر شکل بالا، در نظر گرفتن حالت الاستیک - پلاستیک بسیار مناسب‌تر از حالت الاستیک می‌باشد. همچنین در کاربرد تئوری‌های تماسی گوناگون می‌توان چنین استنباط کرد که مدل تماسی چانگ به دلیل عمومیت و سهل‌الوصول بودن نسبت به مدل تماسی چن، می‌تواند مدل بسیار مناسبی جهت شبیه‌سازی تماس الاستیک-پلاستیک نانوذرات نرم به منظور کاربرد در منیپولیشن میکرو/نانو ذرات زیستی باشد.



شکل 6 بیشینه درصد خطا

[18] H. Hertz, Über die Berührung fester elastischer Körper, *Journal für die reine und angewandte Mathematik*, Vol. 92, pp. 156-171, 1881

[16] W. R. Chang, I. Etsion, D. B. Bogy, An elastic-plastic model for the contact of rough surfaces. *ASME J Tribol*, 109:257-63, 1987.

[17] Y. Chen, W. Norde, C. H. Van der Mei, J. H. Busscher, Bacterial Cell Surface Deformation under External Loading, *mbio*, Vol. 3, Issue, pp. 1-7, 2012.