



Sensitivity Analysis of contact frictional models of Biological Particles on Rough Surface in Liquid Environment by E-Fast Method

Leila Zeinalizad ^a, Moharam Habibnejad Korayem ^{a*}

^a Department of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

Original Article

Use your device to scan and read the article online



Citation: Zeinalizad L, Habibnejad Korayem M. Sensitivity Analysis of contact frictional models of Biological Particles on Rough Surface in Liquid Environment by E-Fast Method. *Mechanics of Advanced and Smart Materials*. 2024;4(1):86-121.

 <https://10.61186/masm.4.1.86>

KEYWORDS

Contact mechanics model,
Viscoelastic,
First phase & second phase of
Nano manipulation,
Nano Biological particles,
Sensitivity analysis.

ABSTRACT

Nano manipulation and displacement of micro/nanoparticles has found wide applications in various sciences today. One of the basic tools for performing the Nano manipulation process is the atomic force microscope. Today, the atomic force microscope has found various applications, including surface imaging, manipulation and movement of particles, extracting the properties of materials and textures. The manipulation of nanoparticles usually involves two phases. The first phase includes the extraction of the critical force and the critical time before the start of the particle movement. The second phase also includes the investigation of particles during movement during Nano manipulation and displacement. Due to the fact that in micro/Nano dimensions, surface forces are more effective than volume forces, so it is very important to choose the appropriate contact model in modeling and simulating the Nano manipulation process. Various parameters affect contact models on the micro/Nano scale. In this research, the effect of different parameters on Hertz, JKR and DMT contact models has been investigated. For this purpose, in order to investigate the effect of different input parameters, the statistical method of sensitivity analysis called E-fast, which is one of the fast methods, has been used. The input parameters examined in this research include tip radius, volume of the particle, elastic modulus of the tip, elastic modulus of the particle, Poisson's coefficient of the tip and Poisson's coefficient of the particle, as well as penetration depth and force, which are explained as output parameters. The obtained results show that the volume of the target particles and the tip radius have a great influence on the force and depth of penetration in the contact models.

Extended Abstract

1. Introduction

Today, Nano manipulation and transfer of nanoparticles has found various, diverse and extensive applications in various sciences, for the purpose of making equipment on small scales, investigating the topology of surfaces, conducting research in biological fields, etc. Bio manipulation is a method of using nanoscale manipulation to move biological materials. In a more precise sense, it can be stated that it refers to contact manipulation, which is the commonly accepted method of sperm intracytoplasmic injection and DNA perinuclear injection. Investigating biological cells in the manipulation process has become important because this type of cell has viscoelastic, spring, and damping properties at the same time. Based on this and in order to model nanoparticles more accurately, it will be important to use a suitable contact model.

* Corresponding author. Tel.: +982177240540

E-mail address: hkorayem@iust.ac.ir

DOI: <https://10.61186/masm.4.1.86>

Received: March 29, 2024; Received in revised form: April 29, 2024; Accepted: May 01, 2024.

© Author



In another review, Habib nejad and his colleagues [1] have analyzed the JKR contact model on the cell in liquid space. The interaction force and adhesion energy have been extracted and added to the equations.

In addition, to analyze the sensitivity of the contact models, Habib Nejad Korayem and his colleagues [2] have investigated the dependence of adhesion energy parameters, elasticity modulus, Poisson's ratio, and particle radius in the manipulation of biological cells. In the following investigations of contact models for biological cells, Habibnejad and Rastgar [3] used Tataru's large deformation contact model and compared the results obtained from the new model with small deformation contact models. With the aim of developing contact models, Korayem and his colleagues [4] have modeled contact theories of cylindrical type and chamfered cylinders based on the theories of Lundberg, Dawson, Nikpour, Hoprich and Hertz for the manipulation of biological nanoparticles. In addition, the Hertz contact model for gold nanoparticles and DNA with spherical, cylindrical, and tapered cylindrical geometries has been simulated and analyzed.

Hui and Benny [5] presented the JKR model for viscoelastic spheres with the aim of showing nonlinear time-dependent mechanical properties for active processes in the cell. The results of this development have shown that determining the surface energy of the material using this theory has problems and alternative methods should be used to determine the adhesion properties.

Chaudhary et al. [6], in research, have expanded the JKR model for contact conditions, including the adhesive contact of an elastic cylinder on a flat and smooth surface.

Focusing on the important role of biological cells, Resch et al. [7] for the first time investigated the precise manipulation of gold nanoparticles on silicon substrate in a liquid environment.

Chu et al. [8] have investigated the JKR contact theory in the manipulation of living cells in research. The obtained results have stated that this theory will be suitable for strong adhesion energy of soft and slightly deformable materials.

In another research, McNamee et al. [9] have investigated the factors affecting the adhesion resistance between living cells and colloid tips.

In the research conducted by Korayem and Gramizadeh [10], they analyzed and simulated DNA cells and yeast cells on the silicon-based surface and the biological liquid environment.

Korayem and his colleagues [11] have studied the sensitivity analysis of the effect of different parameters on the amount of critical time force of two-dimensional manipulation of cylindrical nanoparticles.

In another study conducted by Korayem and his colleagues [12], the effect of different parameters of the cantilever on the force and critical time of manipulation was studied using the Sobel method, and the results were compared with the existing results for rectangular cantilevers and the accuracy of the results was checked

According to the importance of determining the movement modes and the precise position of a particle during the manipulation process, Baghche Saraei and Korayem [13] have investigated the dynamic behaviors and movement modes of biological particles such as DNA, yeast, platelets, and bacteria in the 3D manipulation process.

The effect of nanoparticle geometry and material on contact mechanics in AFM-based manipulation has been studied by Korayem and his colleagues [14]. In this research, to investigate the effect of geometry, the Hertz contact model was used for EPH bio-particles with spherical, cylindrical, and beveled cylindrical shapes. Also, the simulations of two spherical cells, EPH and C3T3, have been compared.

In another work, Korayem and his colleagues [15] developed and modeled elastoplastic contact theories for soft spherical Nano bacteria in order to manipulate various biological nanoparticles. For the first time, korayem and his colleagues [16] have investigated the three-dimensional modeling and simulation of spherical bio-particles in the air environment by considering contact mechanics.

In this research, the models of contact mechanics, the first and second phase of nanoparticle manipulation, in liquid and air environments on the rough surface have been theoretically modeled and analyzed by E-fast statistical method.

The main goal of this research is to investigate the behavior of the presented models for nanoparticles in the field of contact mechanics with the E-fast statistical method of sensitivity analysis. This causes appropriate models to be selected according to the geometry, material of the nanoparticle and the environment in which the manipulation takes place.

2. Modeling and formulation

One of the main parts of nanoscale research is contact Nano mechanics. Contact mechanics is the science of contact and collision of various objects with each other and their investigation in different states. The contact phenomenon plays a key role in the analysis of adhesion, indentation depth and deformation of the sample surface. Penetration depth, contact radius, speed of penetration depth, duration of contact, pressure profile and force profile are among the most important parameters that are investigated in contact mechanics. Meanwhile, penetration depth and contact radius play the most important role in the use of contact mechanics in manipulation. According to the geometry of the sample, various theories have been presented in the field of contact mechanics.

2.1 Hertz contact model

Hertz contact equations are obtained as follows.

$$F_{(adh)Hertz} = 0 \quad (1)$$

$$a_{Hertz} = \left(\frac{R_p P_z}{K} \right)^{1/3} \quad (2)$$

$$\delta_{Hertz} = \frac{a_{Hertz}^2}{R_p} \quad (3)$$

3. JKR contact model

One of the more advanced models of contact mechanics is the JKR model. In this theory, a strong adhesion force is assumed at the equilibrium distance z_0 for all distances greater than z_0 , negligible reaction forces, attraction forces only inside the contact surface and adhesion forces cover infinitely close distances. This theory is expressed in equations 4 to 6.

$$F_{(adh)JKR} = -\frac{3}{2}\pi\gamma R \quad (4)$$

$$\delta = \frac{a_{JKR}^2}{R} - \sqrt{\frac{8\pi\gamma a_{JKR}}{3k}} \quad (5)$$

$$a_{JKR} = \left[\frac{R}{K} \sqrt{F_{(adh)JKR}} + \sqrt{(F - F_{(adh)JKR})} \right]^{1/3} \quad (6)$$

3.1 DMT contact model

DMT theory is presented based on a model by Derjaguin, Toporov and Muller [17]. This theory includes the adhesion forces outside the contact surface by considering the gravitational forces in the far field. The equations of adhesion force and contact surface of DMT theory are as follows:

$$F_{(adh)DMT} = -2\pi\gamma R \quad (7)$$

$$\delta = \frac{a_{DMT}^2}{R} \quad (8)$$

$$a_{DMT} = \left[\frac{R(F - F_{(adh)DMT})}{K} \right]^{1/3} \quad (9)$$

In this part, experimental and numerical simulations of the three mentioned contact models have been investigated for the purpose of verification. The results of this comparison can be seen in Figure 1. According to the picture, it can be stated that this path predicted by the developed viscoelastic theory is largely consistent with the experimental data.

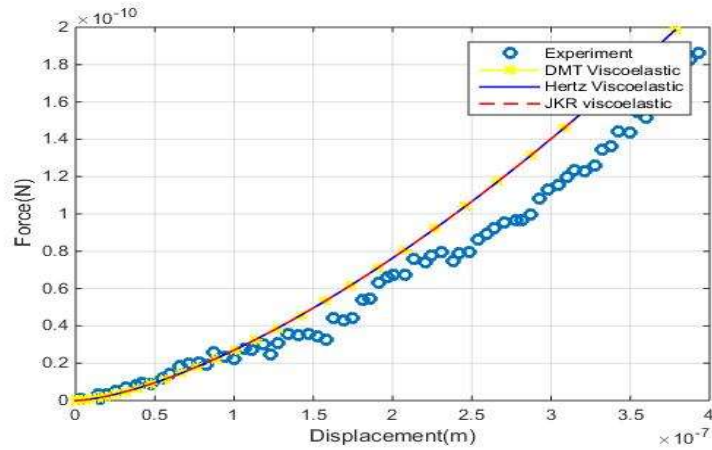
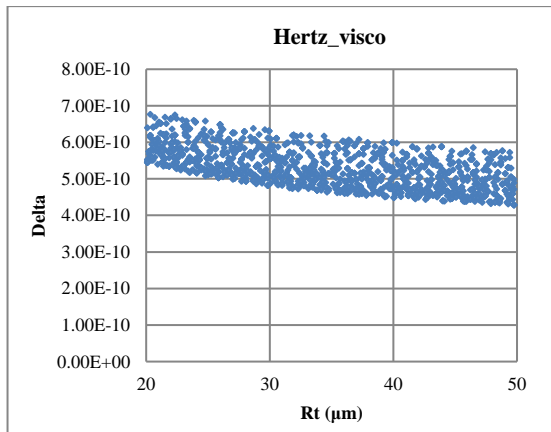


Figure 1. Parametric modeling of viscoelastic contact mechanics models and validation of results with numerical model

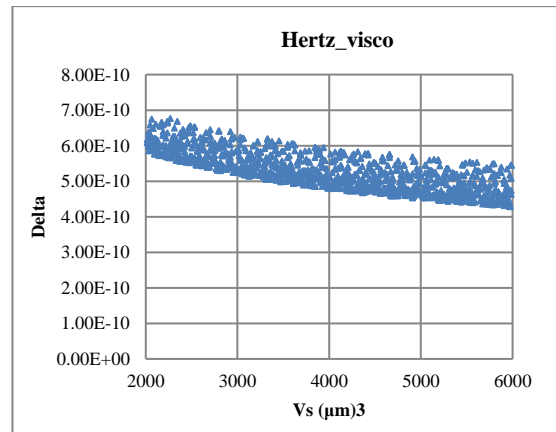
4. Results

4.1 Hertz contact model

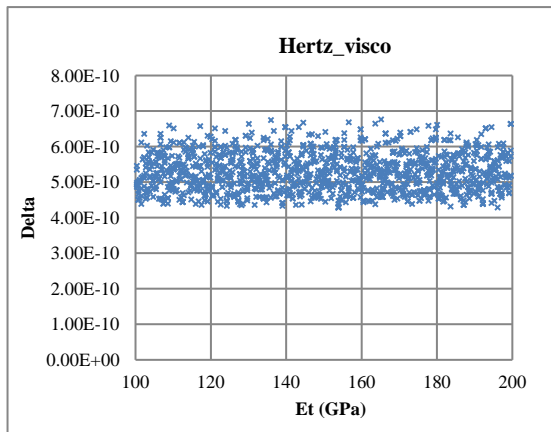
Figure 2 shows the effect of different parameters on penetration depth in the Hertz contact model. According to Figure 2-a and Figure 2-b, with increasing tip radius and increasing particle volume, we will see a relatively large decrease in penetration depth. Figure 2-c shows the relative increase in the depth of penetration with the increase in the elastic modulus of the cell and Figure 2-d shows the lower increase in the depth of penetration with the increase in the elasticity modulus of the particle. According to figures 2-e and 2-f, the Poisson's ratio of the tip and the Poisson's ratio of the particle will not have much effect on the penetration depth.



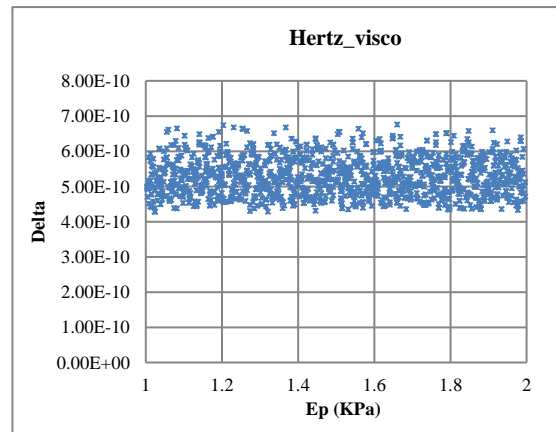
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 2. The effect of different parameters on penetration depth in Hertz contact model

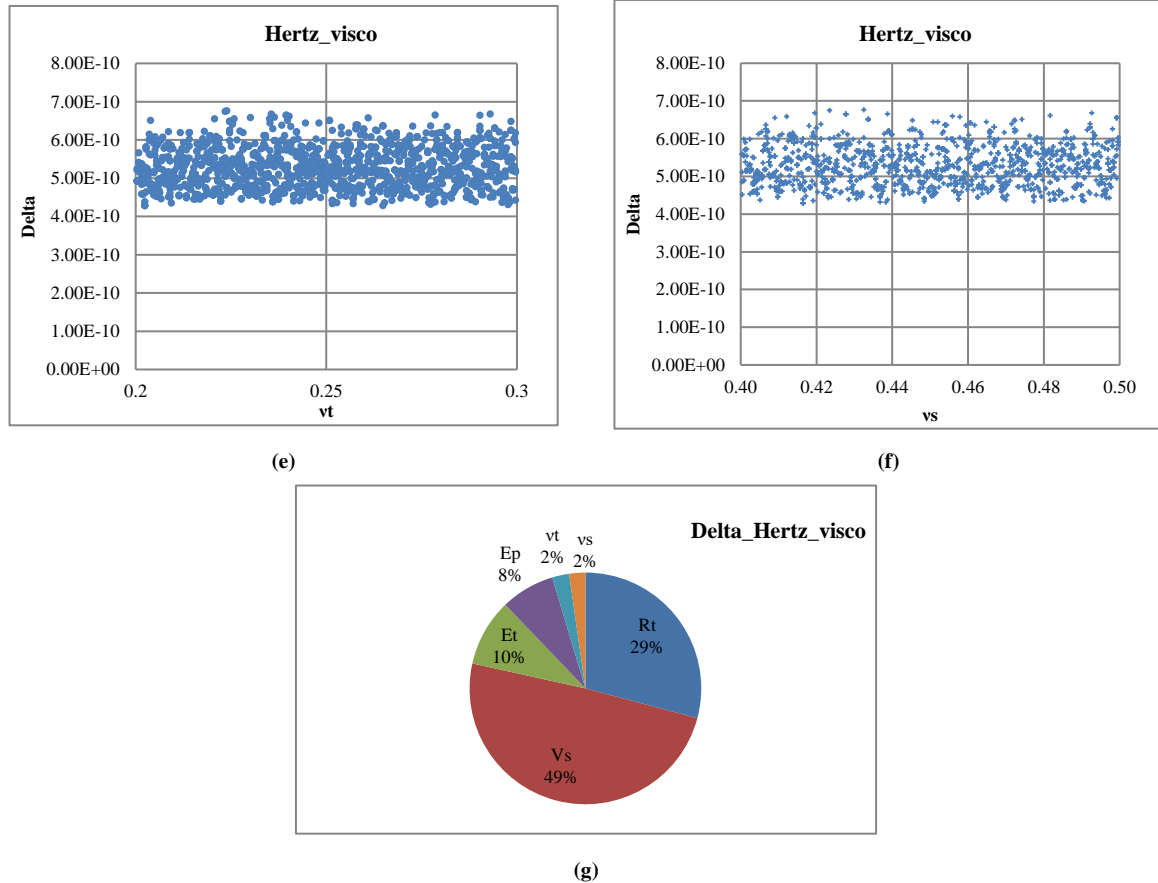


Figure 2. The effect of different parameters on penetration depth in Hertz contact model (continued)

Figure 2-g shows the effect percentage of the six investigated parameters on the depth of penetration, according to the results of the sensitivity analysis investigated by the E-fast method. In this figure, the particle volume with 49% influence and the tip radius with 29% influence are the most important parameters affecting the penetration depth.

Figure 3 shows the effect of different parameters on force in the Hertz contact model. According to Figure 3-a and Figure 3-b, increasing the tip radius, increasing the particle volume will result in a relatively large decrease in force. Figure 3-c shows the relative increase in force with the increase in the elastic modulus of the cell, and in Figure 3-d, the smaller increase in force with the increase in the particle's modulus of elasticity is shown. Figures 3-e and 3-f also show that the Poisson coefficients of the tip and the particle will have a very small effect on the force. Figure 3-g shows the effect percentage of the six investigated parameters quantitatively on the force, using the statistical method. The results of this figure indicate that the particle volume with 51% effectiveness and the tip radius with 28% effectiveness will be very effective parameters for the force.

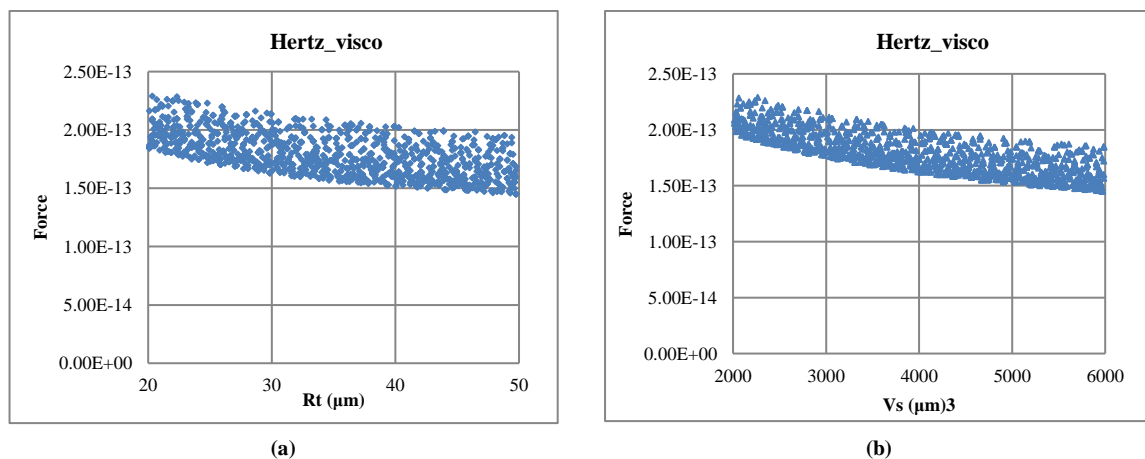


Figure 3. Effect of different parameters on force in Hertz contact model (Figure continues on next page)

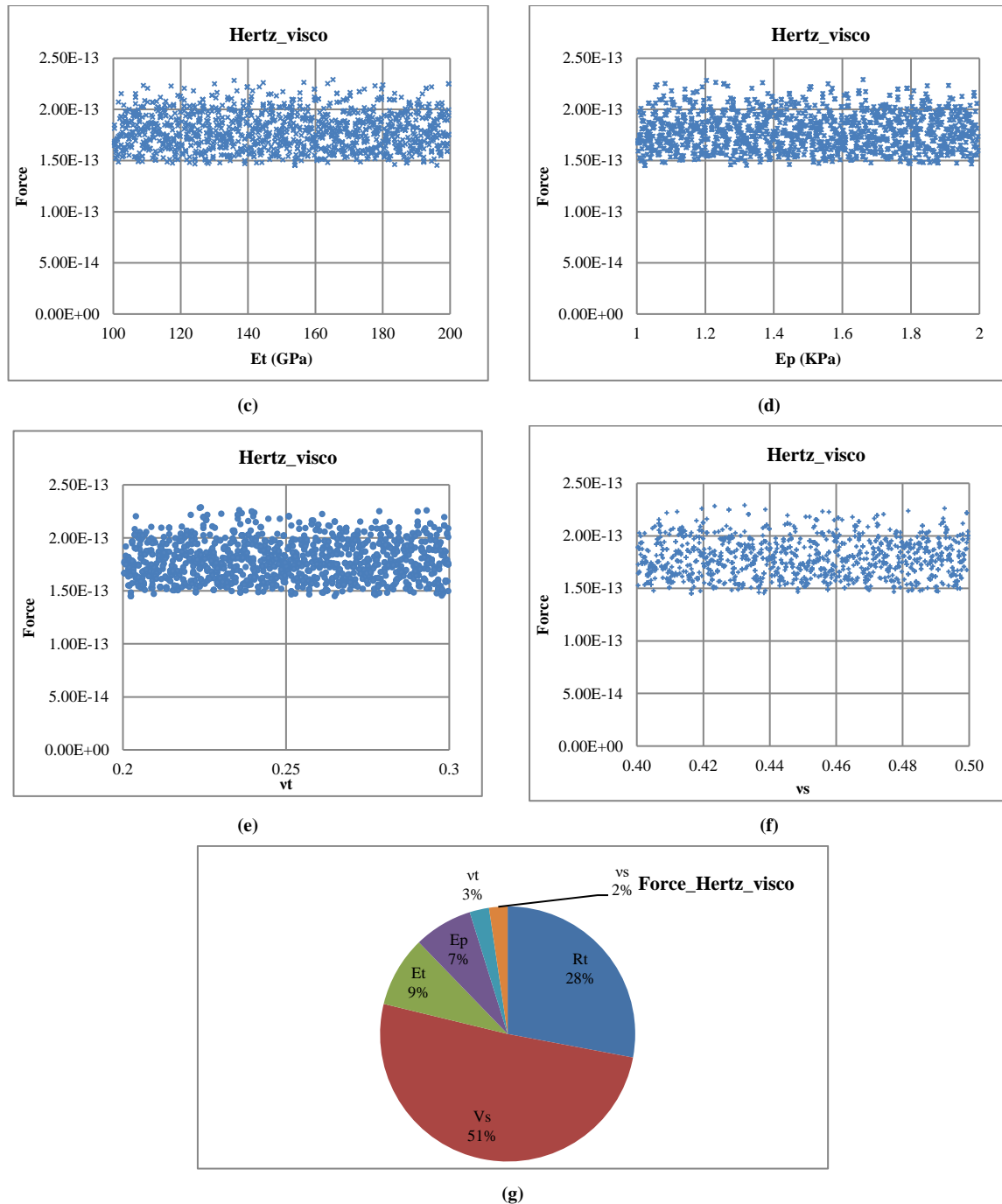


Figure 3. Effect of different parameters on force in Hertz contact model (continued)

1.1. JKR contact model

Figure 4 shows the effect of different parameters on penetration depth in the JKR contact model. According to Figure 4-a, with the increase of the tip radius, we will see a relatively large decrease in the depth of penetration. Figure 4-b shows a great decrease in penetration depth with increasing particle volume. Figure 4-c shows the relative increase in the penetration depth with the increase in the elastic modulus of the cell and Figure 4-d shows a less increase in the penetration depth with the increase in the elasticity modulus of the particle. According to Figures 4-e and 4-f, the Poisson's coefficient of the tip and the Poisson's coefficient of the particle will not have much effect on the penetration depth. It can be seen in Figure 4-g that the particle volume with 46% influence and the tip radius with 27% influence are the effective parameters on penetration depth.

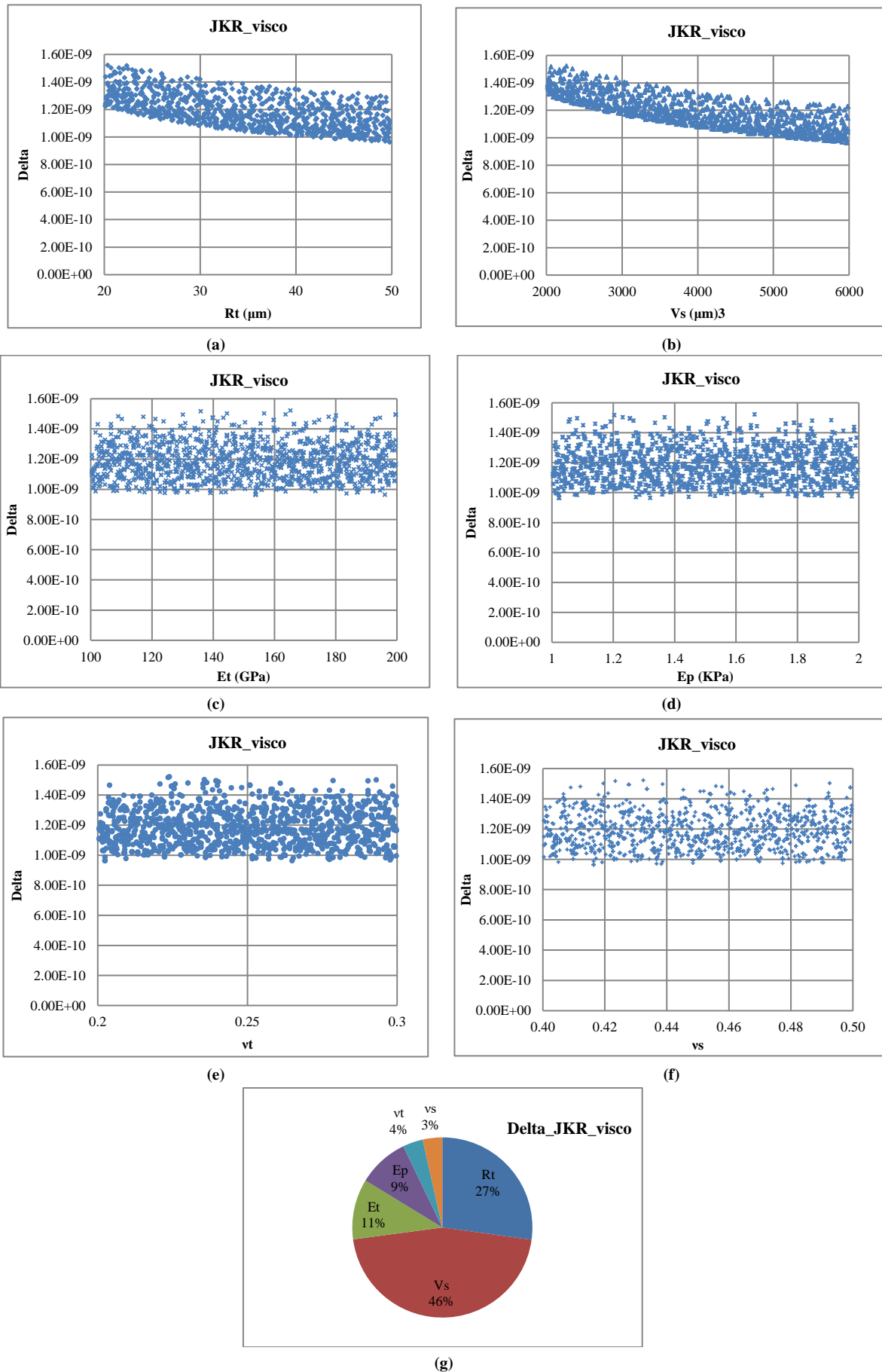


Figure 4. The effect of different parameters on penetration depth in JKR contact model

Figure 5 also shows the effect of different parameters on the force in the JKR contact model. According to Figure 5-a and Figure 5-b, increasing the tip radius and the volume of the particle will result in a relatively large decrease in force. Figure 5-c shows the relative increase in force with the increase of the elastic modulus of the cell, and in Figure 5-d, the smaller increase in force with the increase of a particle's modulus of elasticity is shown. Diagrams 5-e and 18-f also show that the Poisson coefficients of the tip and the particle will have a very small effect on the force. The results of Figure 5-g show that particle volume with 48% effectiveness and the tip radius with 26% effectiveness are very effective and sensitive parameters for force.

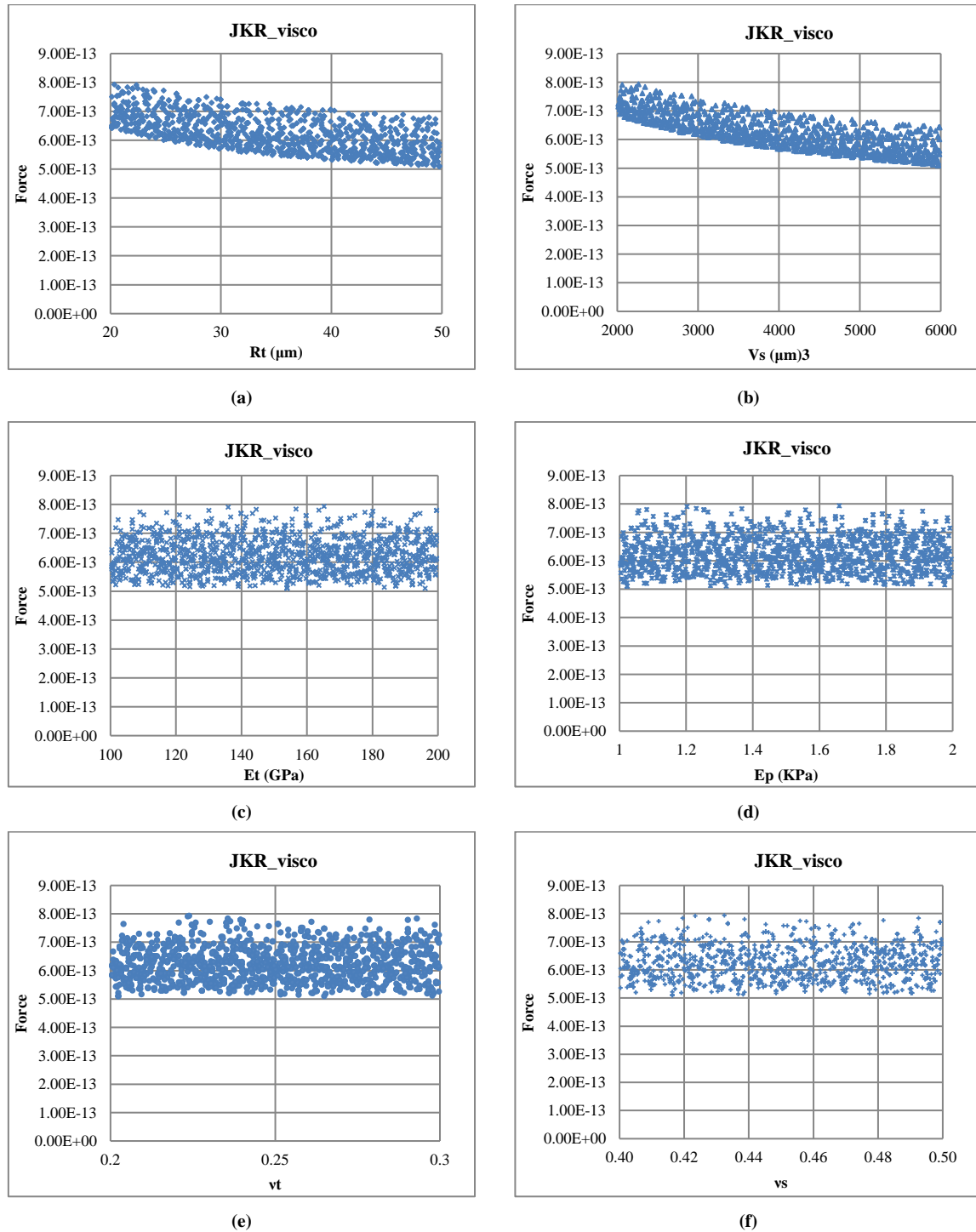


Figure 5. Effect of different parameters on force in JKR contact model (Figure continues on next page)

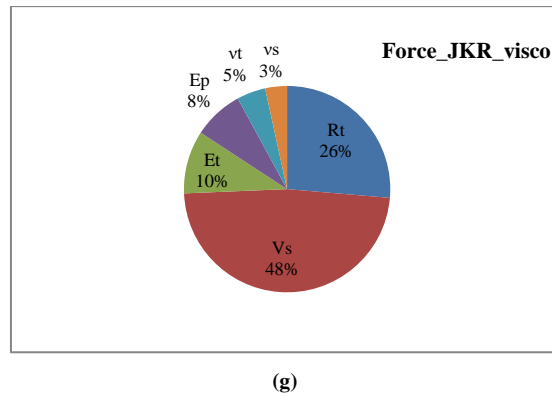


Figure 5. Effect of different parameters on force in JKR contact model (continued)

1.2. DMT contact model

The effect of different parameters on penetration depth is shown in the DMT contact model in Figure 6. Based on graphs (a) and (b), with the increase of the tip radius and particle volume, we will see a relatively large decrease in penetration depth. Figure (c) shows the relative increase in the depth of penetration with the increase in the elastic modulus of the cell. Also, figure (d) shows the slight increase in the depth of penetration because of the increase in the modulus of elasticity of the particle. According to figures (e) and (f), it can be stated that the Poisson's ratio of the tip and the Poisson's ratio of the particle will not have much effect on the penetration depth. In the graphic diagram (g), it can be seen that the particle volume with 42% influence and the tip radius with 32% influence are the effective parameters for the penetration depth.

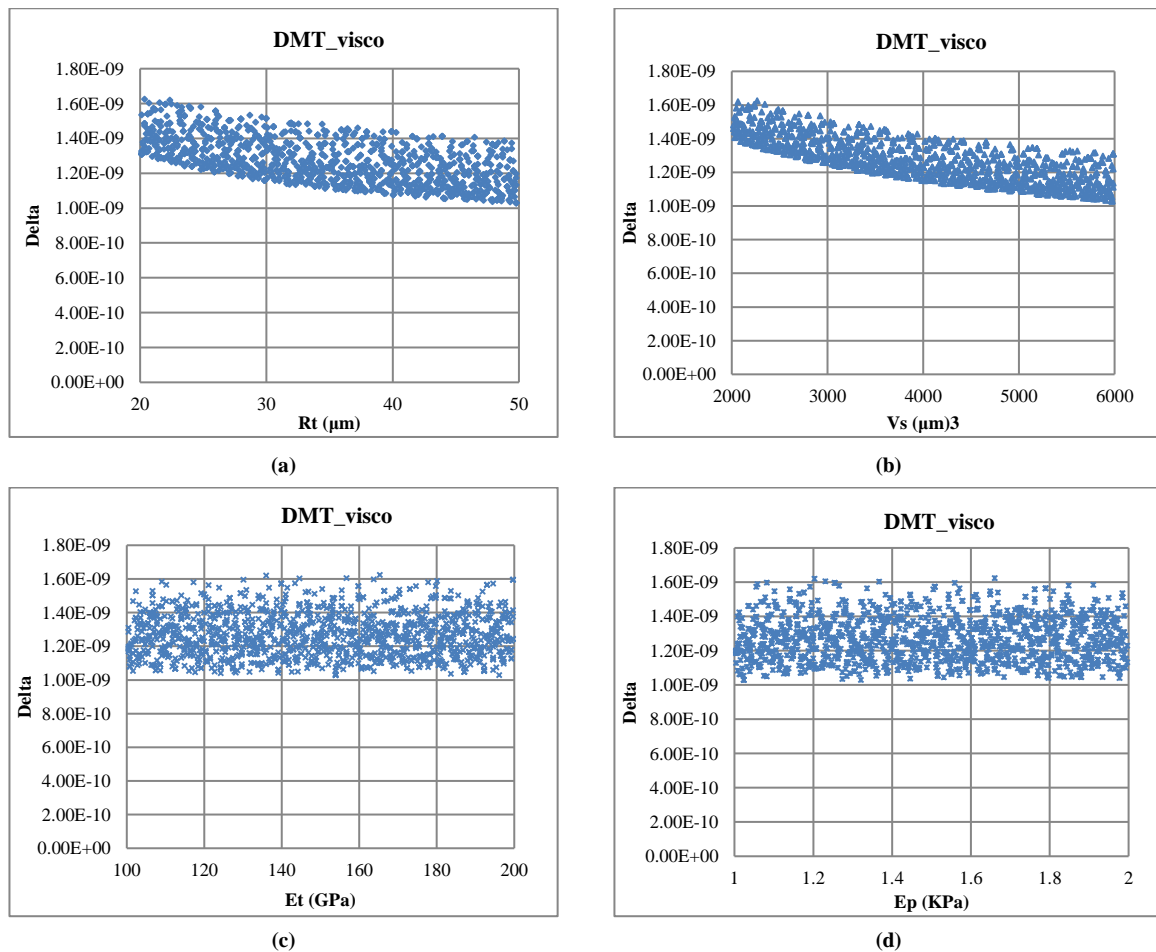


Figure 6. The effect of different parameters on penetration depth in DMT contact model (Figure continues on next page)

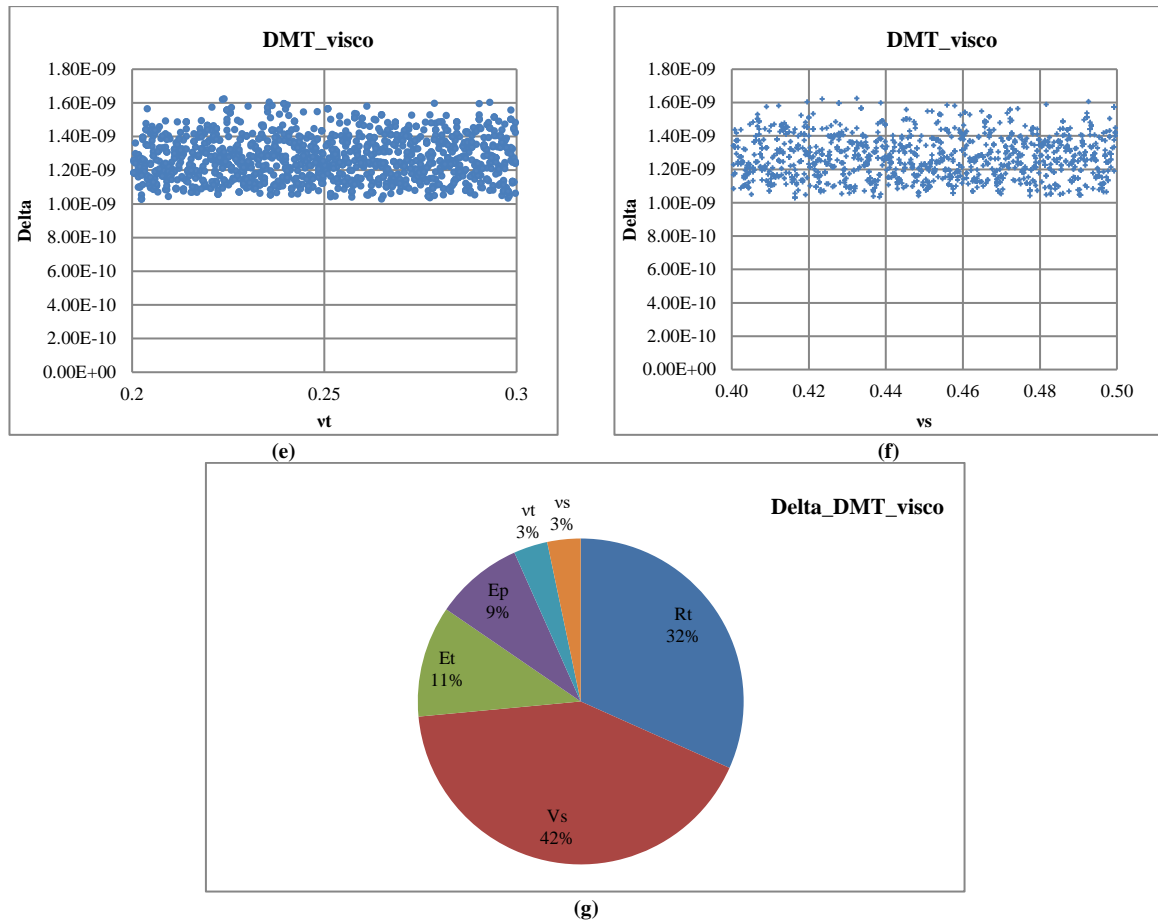


Figure 6. The effect of different parameters on penetration depth in DMT contact model (continued)

The effect of different parameters on the force in the DMT contact model is shown in Figure 7. According to diagram (a), increasing the tip radius will result in a relatively large decrease in force. It can also be seen in the diagram (b) that the increase in the particle volume is accompanied by a large decrease in force. The relative increase of the force with the increase of the elastic modulus of the cell and the increase of the elastic modulus of the particle are shown in graphs (c) and (d), respectively. Based on the graphs (e) and (f), it can be stated that the Poisson coefficients of the tip and the particle will have a very small effect on the force. Figure 20-g also shows the effect percentage of the six investigated parameters on the depth of penetration according to the results of the sensitivity analysis investigated by the E-fast method. In this figure, particle volume with 42% influence and the tip radius with 32% influence are effective parameters for penetration depth. By looking at figure 20-z, it can be stated that the particle volume with 44% effect and the tip radius with 31% effect are very effective parameters for force.

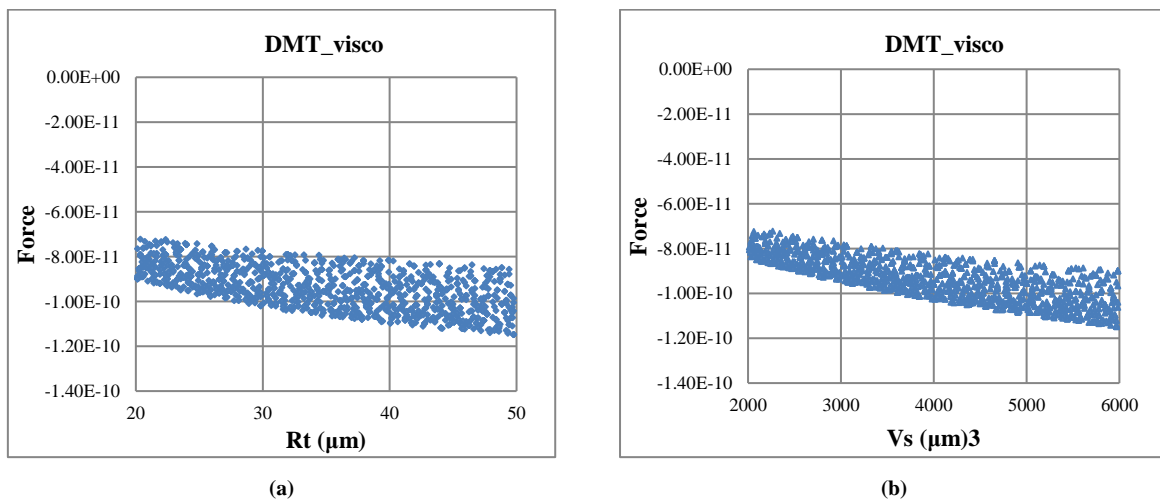


Figure 7. Effect of different parameters on force in DMT contact model (Figure continues on next page)

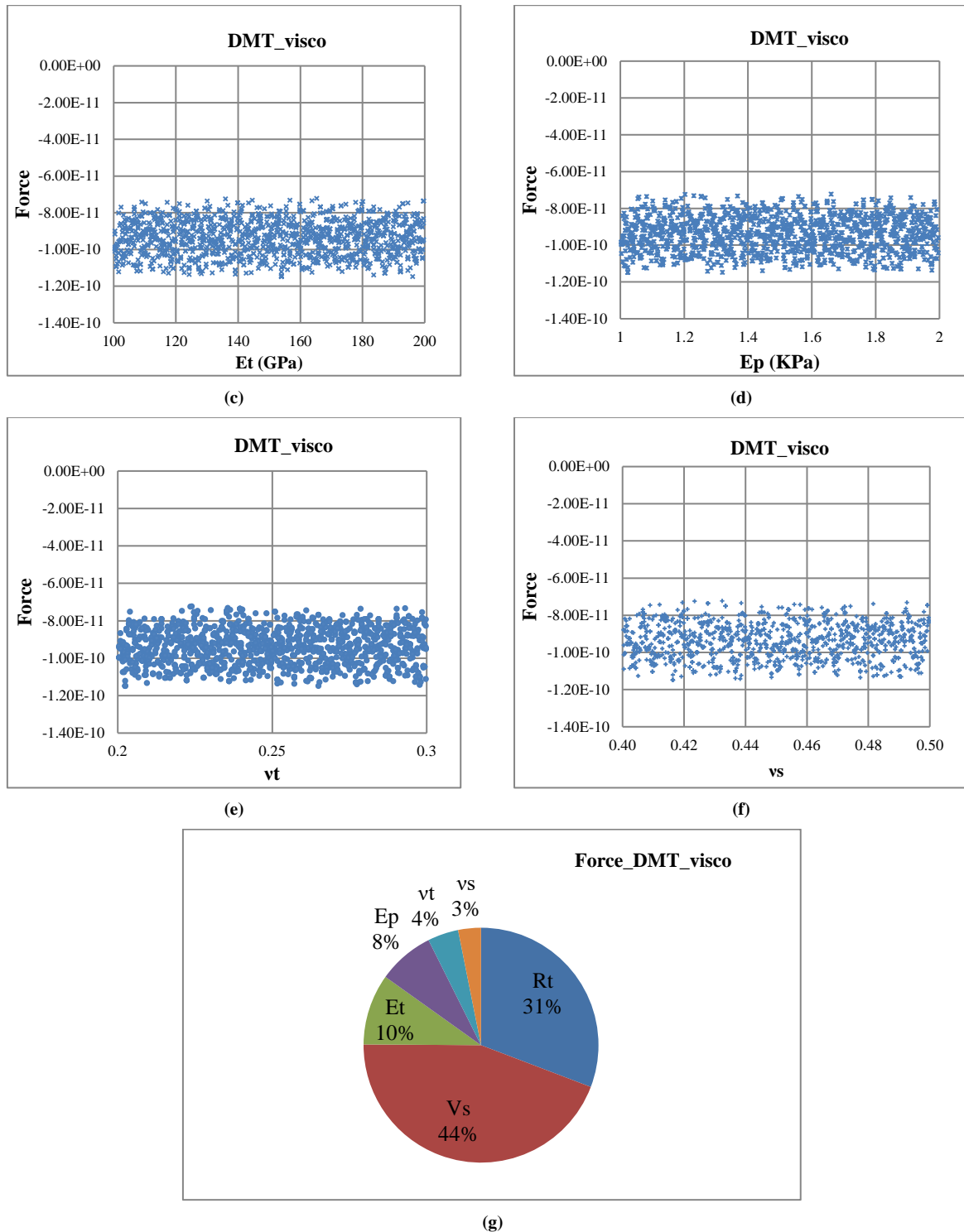


Figure 7. Effect of different parameters on force in DMT contact model (continued)

5. Conclusion

In this research, contact models including Hertz, JKR and DMT models in liquid environments have been investigated and developed. In the last part of this research, the influence of different inputs on the intended outputs has been investigated qualitatively. It is necessary to state that all validation of this research has been done using sensitivity analysis using the E-fast method. With the aim of analyzing the contact models, the effect of the input parameters, which are tip radius, particle volume, elasticity modulus of the tip, elasticity modulus of the particle, Poisson's ratio of the tip, and Poisson's ratio of the particle, of the Nano manipulation process on two output parameters force, and depth of penetration has been researched.

The summary of the results obtained from this research is as follows:

1. The particle volume is a sensitive parameter affecting the depth of penetration and force with 49 and 51% effectiveness respectively in the Hertz model.
2. The particle volume is a sensitive parameter affecting the depth of penetration and power in the JKR model at 46 and 48%, respectively.
3. The particle volume is a sensitive parameter affecting the penetration depth and power in the DMT model with 42 and 44% effectiveness, respectively.

In order to realize productivity and develop the process of Nano manipulation, other contact models, dimensional parameters and environmental parameters, sensitivity analysis with other statistical methods and investigation of different shapes of nanoparticles are recommended.



آنالیز حساسیت مدل های تماسی اصطکاکی ذرات زیستی روی سطح زبر در محیط مایع به روش ای-فست

لیلا زینالی زاد الف*، محرم حبیب نژاد کورایم ب

الف دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران، zeinalizad@gmail.com

ب استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران، hkorayem@iust.ac.ir

چکیده	واژگان کلیدی
<p>نانومنیپولیشن و جابه‌جایی میکرو/نانو ذرات، امروزه کاربردهای گسترده‌ای در علوم مختلف پیدا کرده است. یکی از ابزارهای اساسی جهت انجام فرآیند نانومنیپولیشن، میکروسکوپ نیروی اتمی می‌باشد. امروزه میکروسکوپ نیروی اتمی کاربردهای مختلفی از جمله تصویربرداری سطوح، منیپولیشن و جابه‌جایی ذرات، استخراج خواص مواد و بافت‌ها پیدا کرده است. منیپولیشن نانو ذرات معمولاً شامل دو فاز می‌گردد. فاز نخست تا پیش از آغاز به حرکت ذره و استخراج نیروی بحرانی و زمان بحرانی را در برمی‌گیرد. فاز دوم نیز شامل بررسی ذرات در حین حرکت در خلال نانومنیپولیشن و جابه‌جایی می‌باشد. با توجه به این که در ابعاد میکرو/نانو، نیروهای سطحی نسبت به نیروهای حجمی اثر بیشتری دارند، لذا انتخاب مدل تماسی مناسب در مدل سازی و شبیه سازی فرآیند نانومنیپولیشن، بسیار حائز اهمیت می‌باشد. پارامترهای مختلفی بر مدل‌های تماسی در مقیاس میکرو/نانو اثر گذار می‌باشند. در این پژوهش به بررسی تأثیر پارامترهای مختلف بر مدل‌های تماسی هرتز، جی‌کی‌آر و دی‌ام‌تی پرداخته شده است. بدین منظور جهت بررسی تأثیر پارامترهای ورودی مختلف، از روش آماری آنالیز حساسیت تحت عنوان ای-فست که یکی از روش‌های سریع می‌باشد، استفاده شده است. پارامترهای ورودی مورد بررسی در این پژوهش، شامل شعاع سوزن، حجم ذره، مدول الاستیسیته سوزن، مدول الاستیسیته ذره، ضریب پواسون سوزن و ضریب پواسون ذره همچنین عمق نفوذ و نیرو به عنوان پارامترهای خروجی تبیین می‌گردد. نتایج به دست آمده بیانگر تأثیرگذاری زیاد حجم ذرات هدف و شعاع سوزن در نیرو و عمق نفوذ در مدل‌های تماسی می‌باشد.</p>	<p>مدل مکانیک تماس، ویسکوالاستیک، فاز اول و فاز دوم نانومنیپولیشن، نانوذرات زیستی، آنالیز حساسیت.</p> <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۱۰ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۲/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۱۲</p>

۱- مقدمه

نانومنیپولیشن^۱ و جابه‌جایی نانوذرات، امروزه کاربردهای مختلف، متنوع و گسترده‌ای در علوم مختلف، جهت ساخت تجهیزات در مقیاس‌های کوچک، بررسی توپولوژی سطوح، انجام تحقیقات در حوزه‌های بیولوژیکی و غیره یافته است. بیومنیپولیشن^۲ یک روش استفاده از منیپولیشن در مقیاس نانو برای جابه‌جایی مواد زیستی است که اشاره به منیپولیشن تماسی دارد و این روش

¹ Nano manipulation

² Bio manipulation

معمول پذیرفته شده در تزریق داخل سیتوپلاسمی اسپرم^۳ و تزریق اطراف هسته‌ای دی‌ان‌ای به کار می‌رود. بررسی سلول‌های زیستی در فرآیند منیپولیشن از آنجا اهمیت یافته است که این نوع سلول هم‌زمان دارای خاصیت ویسکوالاستیک، خواص فنریت و دمپینگ^۴ است. بر این اساس و به منظور مدل‌سازی دقیق‌تر نانو ذرات بهره‌گیری از مدل تماسی مناسب مورد توجه خواهد بود.

حبیب نژاد و همکارانش [۱] مدل تماسی جی کی آر^۵ بر روی سلول در محیط مایع را مورد تحلیل قرار داده‌اند. نیروی برهم‌کنش و انرژی چسبندگی استخراج شده و در معادلات افزون گردیده است. علاوه بر این، به منظور آنالیز حساسیت مدل‌های تماسی حبیب نژاد کورایم و همکارانش [۲] وابستگی پارامترهای انرژی چسبندگی، مدول الاستیسیته، ضریب پواسون و شعاع ذره در منیپولیشن سلول‌های بیولوژیک را بررسی کرده‌اند.

در ادامه بررسی‌های مدل‌های تماسی برای سلول‌های بیولوژیک حبیب نژاد و رستگار [۳] مدل تماسی تغییر شکل بزرگ تاتارا^۶ را مورد استفاده قرار داده و نتایج به دست آمده از مدل جدید را با مدل‌های تماسی تغییر شکل کوچک مورد مقایسه قرار دادند.

با هدف توسعه مدل‌های تماسی کورایم و همکارانش [۴] تئوری‌های تماس نوع استوانه‌ای و استوانه‌ای پخ خورده بر اساس تئوری‌های لاندبرگ^۷، دوسون^۸، نیکپور، هوپریچ^۹ و هرترز برای منیپولیشن نانو ذرات بیولوژیکی مدل‌سازی کرده‌اند. افزون بر این مدل تماسی هرترز برای نانوذرات طلا و دی‌ان‌ای با هندسه‌های کروی، استوانه‌ای و استوانه‌ای پخ خورده شبیه‌سازی و تحلیل گردیده است.

هوئی و بنی [۵] با هدف نشان دادن غیرخطی خصوصیات مکانیکی وابسته به زمان برای فرآیندهای فعال در سلول، مدل جی کی آر برای کره‌های ویسکوالاستیک ارائه دادند. نتایج این پیشرفت نشان داده است که تعیین انرژی سطحی ماده با استفاده از این تئوری دارای مشکلاتی است و برای مشخص نمودن خصوصیات چسبندگی می‌بایست از روش‌های جایگزین استفاده نمود.

چاودری و همکاران [۶] در پژوهشی اقدام به گسترش مدل جی کی آر برای شرایط تماسی از جمله تماس چسبنده‌ی استوانه‌ای الاستیک در سطح مسطح و صاف پرداخته‌اند.

با تمرکز بر نقش مهم سلول‌های بیولوژیکی، ریچ و همکاران [۷] برای اولین بار منیپولیشن دقیق نانوذرات طلا بر روی بستر سیلیکونی در محیط مایع را مورد بررسی قرار داده‌اند.

چو و همکاران [۸] در پژوهشی اقدام به بررسی تئوری تماسی جی کی آر در منیپولیشن سلول‌های زنده نموده‌اند. نتایج حاصل شده بیان نموده است که این تئوری برای انرژی چسبندگی قوی از مواد نرم و کمی تغییر شکل‌پذیر مناسب خواهد بود. در تحقیقی دیگر، مکنیم و همکاران [۹] عوامل مؤثر بر مقاومت چسبندگی بین سلول‌های زنده و سوزن کلونیدی را مورد بررسی قرار داده‌اند.

در پژوهش صورت گرفته توسط کورایم و گرامی زاده [۱۰] سلول‌های دی‌ان‌ای و سلول‌های مخمر بر روی سطح مبنای سیلیکونی و محیط مایع بیولوژیکی را تحلیل و شبیه‌سازی نموده‌اند.

کورایم و همکارانش [۱۱] در پژوهشی به آنالیز حساسیت تأثیر پارامترهای مختلف بر میزان نیرو زمان بحرانی منیپولیشن دوبعدی نانوذرات استوانه‌ای پرداخته‌اند. در دیگر بررسی صورت گرفته توسط کورایم و همکارانش [۱۲] تأثیر پارامترهای مختلف تیرک بر نیرو و زمان بحرانی منیپولیشن با استفاده از روش سوبل پرداخته و نتایج حاصل با نتایج موجود برای تیرک‌های مستطیلی مقایسه و صحت نتایج را بررسی نموده‌اند.

³ sperm intracytoplasmic injection

⁴ Damping

⁵ JKR Contact Model (Johnson-Kendall-Roberts Contact Model)

⁶ Tatar's large deformation contact model

⁷ Landburg

⁸ Dawson

⁹ Hoprich

بنابر میزان اهمیت تعیین موده‌های حرکتی و موقعیت دقیق ذره‌ای در خلال فرآیند منیپولیشن، باغچه سرایی و کورایم [۱۳] رفتارهای دینامیکی و موده‌های حرکتی ذرات زیستی نظیر دی ان ای، مخمر، پلاکت و باکتری را در فرآیند منیپولیشن سه‌بعدی را مورد بررسی قرار دادند.

اثر هندسه و جنس نانوذره بر مکانیک تماس در منیپولیشن مبتنی بر ای اف ام^{۱۰} توسط کورایم و همکارانش [۱۴] مورد مطالعه قرار گرفته است. در این تحقیق برای بررسی اثر هندسه از مدل تماسی هرتز برای میکرو ذره‌ی زیستی ای پی اچ^{۱۱} با اشکال کروی، استوانه‌ای و استوانه‌ی پخ خورده استفاده شده است. همچنین شبیه‌سازی‌های دو سلول کروی ای پی اچ و سی تری تی^{۱۲} مورد مقایسه قرار گرفته است. کورایم و همکارانش [۱۵] در کار دیگری به توسعه و مدل‌سازی تئوری‌های تماسی الاستوپلاستیک جهت نانو باکتری‌های نرم کروی شکل به‌منظور منیپولیشن نانو ذرات زیستی مختلف پرداختند.

برای اولین بار کورایم و همکارانش [۱۶] مدل‌سازی و شبیه‌سازی سه‌بعدی ذرات زیستی کروی در محیط هوا با در نظر گرفتن مکانیک تماس را مورد بررسی قرار داده‌اند.

در این پژوهش، مدل‌های مکانیک تماس، فاز اول و دوم منیپولیشن نانو ذرات، در محیط مایع و هوا بر روی سطح زبر به‌صورت تئوری مدل‌سازی و به روش آماری ای-فست مورد آنالیز قرار گرفته است. هدف اصلی این تحقیق بررسی رفتار مدل‌های ارائه‌شده برای نانو ذرات در حوزه‌ی مکانیک تماس با روش آماری ای-فست آنالیز حساسیت تبیین می‌گردد، این امر موجب می‌گردد تا با توجه به هندسه و جنس نانوذره و محیطی که در آن منیپولیشن صورت می‌گیرد، مدل‌های مناسب انتخاب گردد.

۲- مدل‌سازی

یکی از شاخه‌های اصلی تحقیقات در مقیاس نانومتری، نانو مکانیک تماس است. مکانیک تماس علم تماس و برخورد اجسام گوناگون با یکدیگر و بررسی آن‌ها در حالت‌های مختلف است. پدیده تماس در تحلیل چسبندگی، عمق فرورفتگی و تغییر شکل سطح نمونه نقش کلیدی دارد. عمق نفوذ، شعاع تماس، سرعت عمق نفوذ، مدت‌زمان دوام تماس، پروفیل فشار و پروفیل نیرو از مهم‌ترین پارامترهایی است که در مکانیک تماس مورد بررسی قرار می‌گیرند. در این بین عمق نفوذ و شعاع تماس اصلی‌ترین نقش را جهت کاربرد مکانیک تماس در منیپولیشن ایفا می‌کنند. با توجه به هندسه نمونه، تئوری‌های گوناگونی در زمینه‌ی مکانیک تماس ارائه گردیده است.

در این بخش روابط مربوط به مدل‌های تماسی هرتز، جی کی آر، دی ام تی در محیط نرم‌افزاری به‌صورت پارامتری مدل‌سازی شده است. نتایج به‌دست‌آمده پارامتری با نتایج تجربی (عددی) مقایسه گردیده است.

۲-۱- مدل‌های مکانیک تماس

۲-۱-۱- مدل تماسی هرتز

الف) برای ذره و سوزن تیرک

نیروی اعمال‌شده در معادله‌ی هرتز و شعاع معادل ذره برابر خواهد شد با:

$$F = P_z \cos \phi + P_y \sin \phi \quad (1)$$

$$\bar{R} = \frac{R_p \times R_t}{R_p + R_t} \quad (2)$$

لذا معادلات تماسی هرتز به‌صورت زیر به دست خواهند آمد:

$$F_{(adh)Hertz} = 0 \quad (3)$$

¹⁰ AFM (Atomic Force Microscopy)

¹¹ EPH bio-particles

¹² C3T3 bio-particles

$$a_{Hertz} = \left(\frac{(R_p \times R_t)[P_Z \cos \phi + P_Y \sin \phi]}{(R_p + R_t)K} \right)^{1/3} \quad (۴)$$

$$\delta_{Hertz} = \frac{a_{Hertz}^2(R_p + R_t)}{R_p \times R_t} \quad (۵)$$

(ب) برای ذره و صفحه‌ی مینا:

نیروی اعمال شده در معادله‌ی هرتز و شعاع معادل ذره برابر خواهد شد با:

$$F = P_Z \quad (۶)$$

$$\bar{R} = R_p \quad (۷)$$

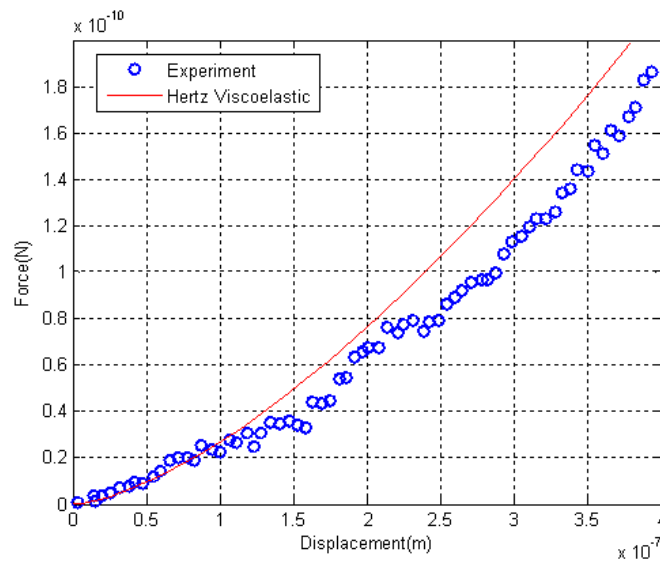
لذا معادلات تماسی هرتز به صورت زیر به دست خواهند آمد:

$$F_{(adh)Hertz} = 0 \quad (۸)$$

$$a_{Hertz} = \left(\frac{R_p P_Z}{K} \right)^{1/3} \quad (۹)$$

$$\delta_{Hertz} = \frac{a_{Hertz}^2}{R_p} \quad (۱۰)$$

در این قسمت ابتدا مدل‌سازی برای مدل تماس مکانیکی هرتز در حالت ویسکوالاستیک صورت گرفته است. شکل ۱ نشان‌دهنده نتایج تجربی و شبیه‌سازی است. بنابر مشاهدات می‌توان اظهار نمود که نیروی لازم برای ایجاد تغییر شکل یکسان در حالت پارامتری بیشتر از حالت تجربی است. این نتیجه قادر به صحت سنجی شبیه‌سازی است.



شکل ۱ مدل‌سازی مدل مکانیک تماس ویسکوالاستیک هرتز

۲-۱-۲- مدل تماسی جی کی آر

یکی از مدل‌های پیشرفته‌تر مکانیک تماس مدل جی کی آر است. در این تئوری یک نیروی چسبندگی قوی در فاصله تعادلی Z_0 فرض می‌شود. برای تمام فواصل بیش از Z_0 ، نیروهای عکس‌العملی ناچیز، نیروهای جاذبه فقط در داخل سطح تماس و نیروهای چسبندگی فواصل بی‌نهایت نزدیک را در برمی‌گیرند. این تئوری در معادلات ۱۱ تا ۱۳ بیان می‌گردند.

$$F_{(adh)JKR} = -\frac{3}{2}\pi\gamma R \quad (11)$$

$$\delta = \frac{a_{JKR}^2}{R} - \sqrt{\frac{8\pi\gamma a_{JKR}}{3k}} \quad (12)$$

$$a_{JKR} = \left[\frac{R}{K} \sqrt{F_{(adh)JKR}} + \sqrt{(F - F_{(adh)JKR})} \right]^{1/3} \quad (13)$$

بر اساس انتخاب محیط مایع برای مدل تماس جی کی آر همچنین با توجه به وجود نیروهای متعدد در این مدل معادله‌ی نیرویی مشابه مدل هرترز خواهیم داشت که معادلات به صورت زیر بیان می‌گردد.

الف) برای ذره و سوزن تیرک:

$$F_{(adh)JKR} = (6\pi\omega^* K a_{JKR}^3)^{1/2} \quad (14)$$

$$a_{JKR} = \left[\frac{(R_p \times R_t)}{(R_p + R_t)K} \left(P_z \cos \phi + P_y \sin \phi + 3\pi \frac{(R_p \times R_t)}{R_p + R_t} \omega^* \right. \right. \\ \left. \left. + \left[6\pi \frac{(R_p \times R_t)}{R_p + R_t} \omega^* (P_z \cos \phi + P_y \sin \phi) + \left(3\pi \frac{(R_p \times R_t)}{R_p + R_t} \omega^* \right)^2 \right]^{1/2} \right) \right]^{1/3} \quad (15)$$

$$\delta_{JKR} = \frac{a_{JKR}^2 (R_p + R_t)}{R_p \times R_t} - \sqrt{\frac{8\pi\omega^* a_{JKR}}{3K}} \quad (16)$$

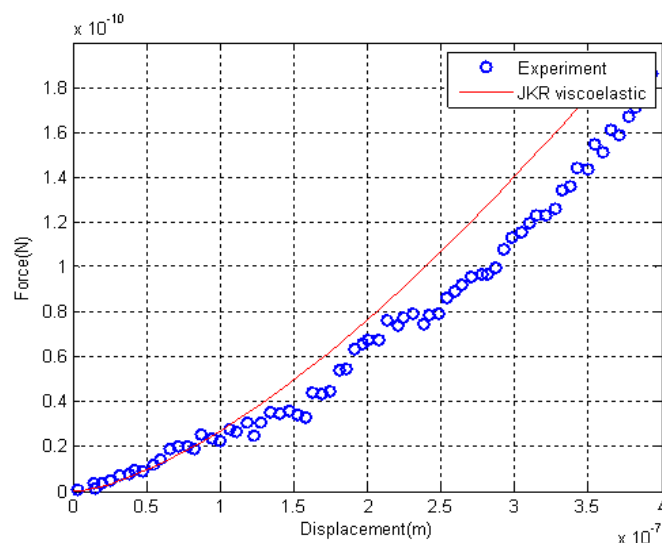
ب) برای ذره و صفحه‌ی مینا:

$$F_{(adh)JKR} = (6\pi\omega^* K a_{JKR}^3)^{1/2} \quad (17)$$

$$a_{JKR} = \left[\frac{R_p}{K} [P_z + 3\pi R_p \omega^* + [6\pi R_p \omega^* P_z + (3\pi R_p \omega^*)^2]^{1/2}] \right]^{1/3} \quad (18)$$

$$\delta_{JKR} = \frac{a_{JKR}^2}{R_p} - \sqrt{\frac{8\pi\omega^* a_{JKR}}{3K}} \quad (19)$$

در این قسمت مدل‌سازی برای حالت ویسکوالاستیک مدل تماس مکانیکی جی کی آر صورت گرفته است. نتایج به دست آمده از مدل جی کی آر همانند مدل هرترز است. و بنابراین نتیجه درستی این مدل‌سازی اثبات می‌گردد.



شکل ۲ مدل‌سازی مدل مکانیک تماس ویسکوالاستیک جی کی آر

۳-۱-۲- مدل تماسی دی‌ام‌تی

تئوری دی‌ام‌تی بر پایه‌ی مدلی توسط درژاگوبین، توپوروف و مولر ارائه شده است [۱۷]. این تئوری با در نظر گرفتن نیروهای جاذبه در حوزه‌ی دور، دربرگیرنده‌ی نیروهای چسبندگی خارج از سطح تماس است. معادلات نیروی چسبندگی و سطح تماس تئوری دی‌ام‌تی به شرح زیر است:

$$F_{(adh)DMT} = -2\pi\gamma R \quad (20)$$

$$\delta = \frac{a_{DMT}^2}{R} \quad (21)$$

$$a_{DMT} = \left[\frac{R(F - F_{(adh)DMT})}{K} \right]^{1/3} \quad (22)$$

الف) برای ذره و سوزن تیرک:

نیروی اعمال‌شده، شعاع معادل ذره و ضریب چسبندگی در محیط مایع برابر خواهد شد با:

$$F = P_Z \cos \phi + P_Y \sin \phi \quad (23)$$

$$\bar{R} = \frac{R_p \times R_t}{R_p + R_t} \quad (24)$$

$$\omega^* = \omega_{tLp} = \omega_{tp} + \omega_{LL} - \omega_{tL} - \omega_{pL} \quad (25)$$

ب) برای ذره و صفحه‌ی مبنا:

$$F = P_Z \quad (26)$$

$$\bar{R} = R_p \quad (27)$$

$$\omega^* = \omega_{sLp} = \omega_{sp} + \omega_{LL} - \omega_{sL} - \omega_{pL} \quad (28)$$

با توسعه مدل دی‌ام‌تی در محیط مایع معادلات تماسی ذره و سوزن تیرک همچنین ذره و سطح مبنا به ترتیب زیر تبیین می‌گردد:

$$F_{(adh)DMT} = 2\pi\omega^* \frac{(R_p + R_t)}{R_p \times R_t} \quad (29)$$

$$a_{DMT} = \left[\frac{(R_p \times R_t)}{(R_p + R_t)K} [P_Z \cos \phi + P_Y \sin \phi + 2\pi \frac{(R_p \times R_t)}{R_p + R_t} \omega^*] \right]^{1/3} \quad (30)$$

$$\delta_{DMT} = \frac{a_{DMT}^2 (R_p + R_t)}{R_p \times R_t} \quad (31)$$

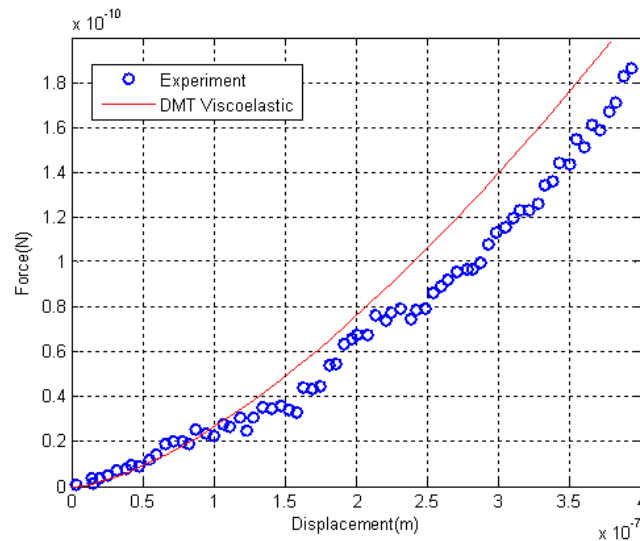
$$F_{(adh)DMT} = 2\pi\omega^* R_p \quad (32)$$

$$a_{DMT} = \left[\frac{R_p}{K} [P_Z + 2\pi\omega^* R_p] \right]^{1/3} \quad (33)$$

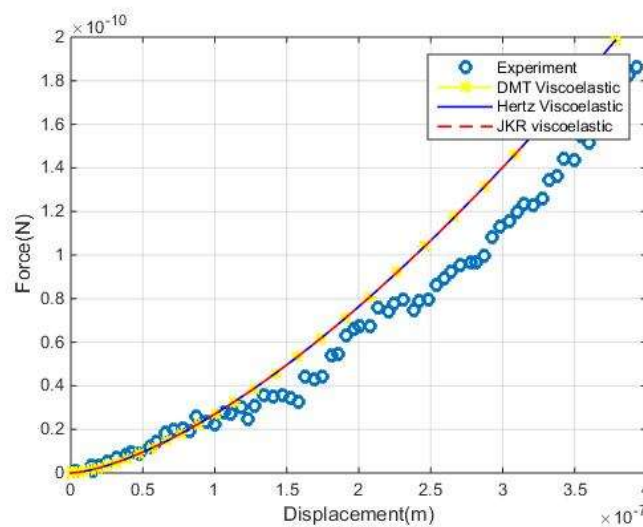
$$\delta_{DMT} = \frac{a_{DMT}^2}{R_p} \quad (34)$$

همان‌طور که در شکل ۳ قابل مشاهده است، نتایج مدل‌سازی مدل تماسی دی‌ام‌تی همانند دو مدل تماسی ذکر شده بیانگر آن است که نیروی لازم برای ایجاد تغییر شکل یکسان در حالت شبیه‌سازی پارامتری بیشتر از حالت تجربی است. این موضوع ضمن تأیید دو مدل هرتز و جی‌کی آر، دلیلی بر صحت نتایج شبیه‌سازی می‌باشد.

باهداف صحت سنجی در این قسمت، شبیه‌سازی‌های تجربی و عددی سه مدل تماسی ذکر شده بررسی گردیده است. نتایج حاصل از این مقایسه در شکل ۴ قابل مشاهده است. با توجه به تصویر می‌توان اظهار نمود که این مسیر پیش‌بینی شده توسط تئوری ویسکوالاستیک توسعه داده شده تا حد زیادی منطبق بر داده‌های تجربی است.



شکل ۳ مدل سازی مدل مکانیک تماس ویسکوالاستیک دی ام تی



شکل ۴ مدل سازی مدل های مکانیک تماس ویسکوالاستیک به صورت پارامتری و صحت سنجی نتایج با مدل عددی

۳- نتایج

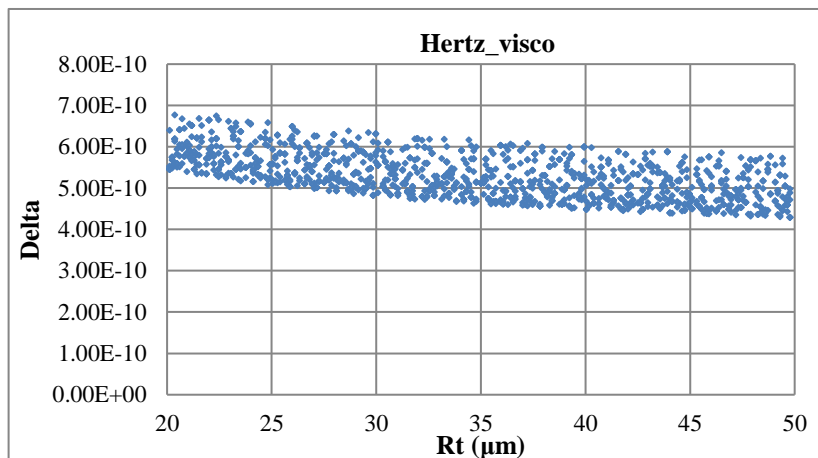
در این بخش با بهره‌گیری از آنالیز حساسیت به روش آماری پارامترهای مؤثر بر مدل‌های تماسی مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج گرافیکی و آماری با استفاده از روش ای-فست ارائه و مقایسه گردیده است.

بر این مبنا تأثیر پارامترهای مختلف ورودی شامل شش پارامتر شعاع سوزن، حجم ذره، مدول الاستیسیته سوزن، مدول الاستیسیته ذره، ضریب پواسون سوزن و ضریب پواسون ذره بر دو پارامتر خروجی شامل نیرو و عمق نفوذ در مدل‌های تماسی هرتز، جی کی آر و دی ام تی تشریح می‌گردد.

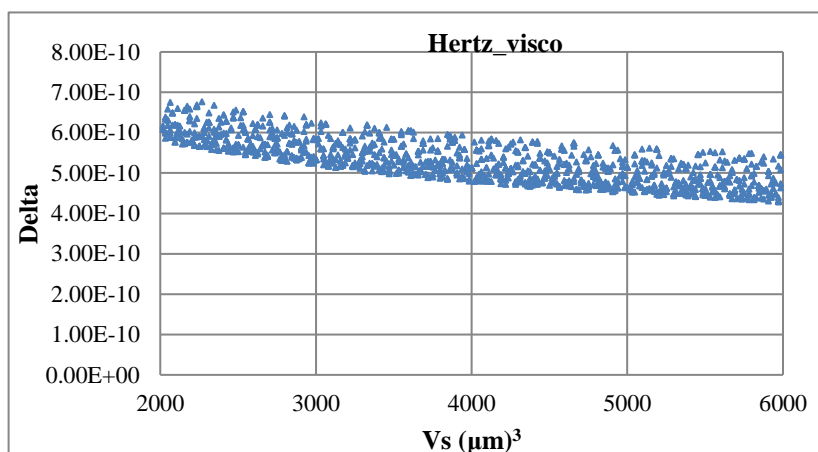
۳-۱- مدل تماسی هرتز

شکل ۵ تأثیر پارامترهای مختلف بر عمق نفوذ را در مدل تماسی هرتز نشان می‌دهد. مطابق شکل ۵-الف و شکل ۵-ب با

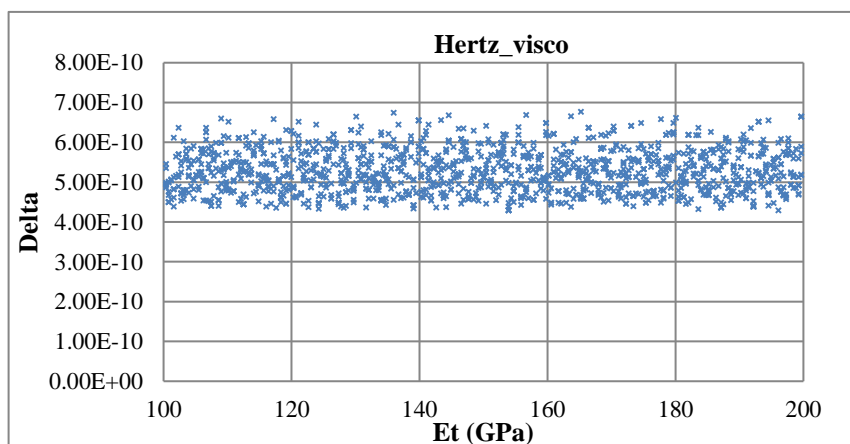
افزایش شعاع سوزن و افزایش حجم ذره کاهش نسبتاً زیاد در عمق نفوذ را شاهد خواهیم بود. شکل ۵-ج افزایش نسبی عمق نفوذ با افزایش مدول الاستیسیته سلول و شکل ۵-د افزایش کم‌تر عمق نفوذ با افزایش مدول الاستیسیته ذره را نشان می‌دهد. با توجه به شکل‌های ۵-ه و ۵-و نیز مشاهده می‌گردد که ضریب پواسون سوزن و ضریب پواسون ذره اثر چندانی بر عمق نفوذ نخواهد داشت.



الف) شعاع سوزن

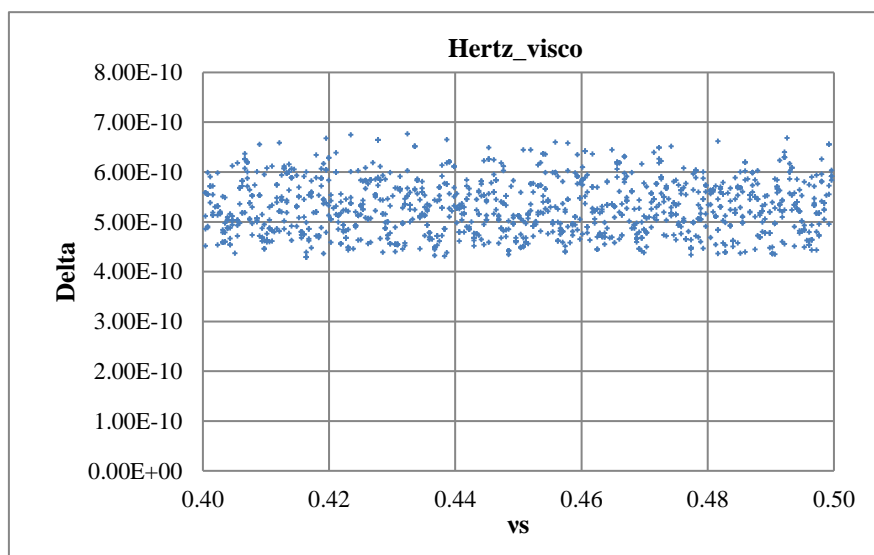
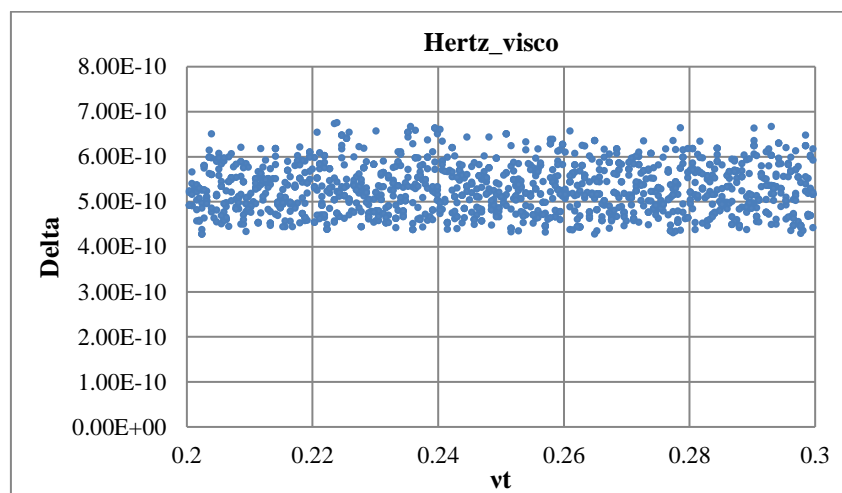
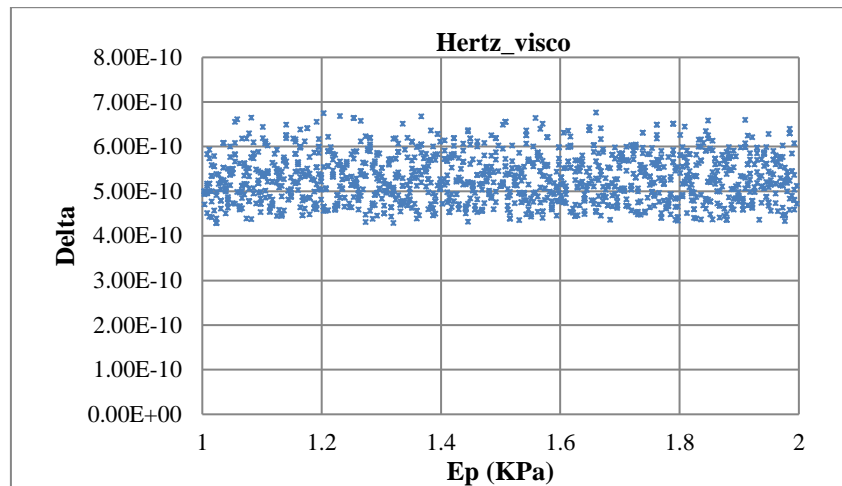


ب) حجم ذره

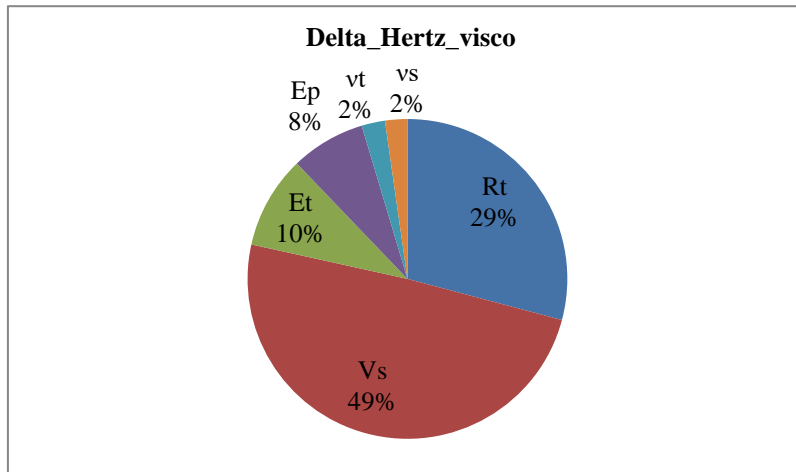


ج) مدول الاستیسیته سوزن

شکل ۵ تأثیر پارامترهای مختلف بر عمق نفوذ در مدل تماسی هر تراز الف) شعاع سوزن، ب) حجم ذره، ج) مدول الاستیسیته سوزن



شکل ۵ تأثیر پارامترهای مختلف بر عمق نفوذ در مدل تماسی هرتز (د) مدول الاستیسیته ذره، (ه) ضریب پواسون سوزن، (و) ضریب پواسون ذره

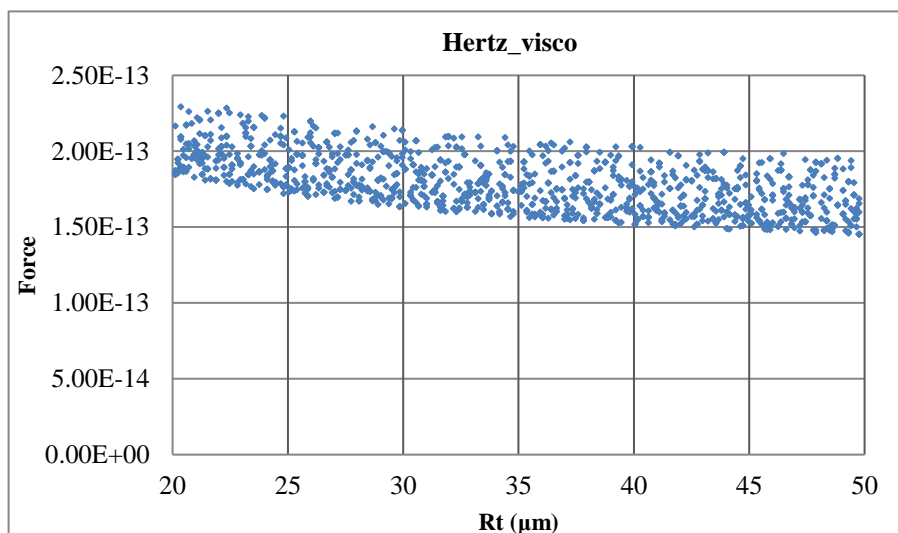


ز) دیاگرام درصد اثرگذاری

شکل ۵ تأثیر پارامترهای مختلف بر عمق نفوذ در مدل تماسی هرتز ز) دیاگرام درصد اثرگذاری

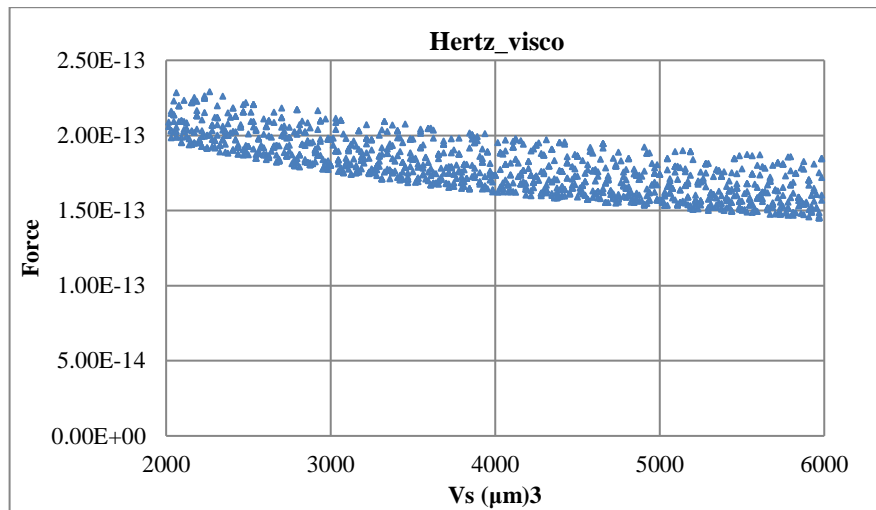
شکل ۵- ز درصد اثرگذاری شش پارامتر مورد بررسی بر عمق نفوذ را مطابق با نتایج آنالیز حساسیت بررسی شده به روش ای-فست، نشان داده شده است. در این شکل مشاهده می‌گردد که حجم ذره با ۴۹ درصد تأثیر و شعاع سوزن با ۲۹ درصد تأثیر، مهم‌ترین پارامترهای مؤثر بر عمق نفوذ می‌باشند.

در شکل ۶ تأثیر پارامترهای مختلف بر نیرو در مدل تماسی هرتز نشان داده شده است. مطابق شکل ۶-الف و شکل ۶-ب افزایش شعاع سوزن، افزایش حجم ذره کاهش نسبتاً زیاد در نیرو را منتج خواهد شد. در شکل ۶-ج افزایش نسبی نیرو با افزایش مدول الاستیسته سلول و در شکل ۶-د نیز افزایش کم‌تر نیرو با افزایش مدول الاستیسته ذره نشان داده شده است. شکل‌های ۶-ه و ۶-و نیز نشان داده می‌شود که ضریب‌های پواسون سوزن و ذره اثر بسیار ناچیزی بر نیرو خواهند داشت. در شکل ۶-ز درصد تأثیر شش پارامتر مورد بررسی به صورت کمی بر نیرو، با استفاده از روش آماری نشان داده شده است. نتایج این شکل بیان‌گر این امر است که حجم ذره با ۵۱ درصد اثرگذاری و شعاع سوزن با ۲۸ درصد اثرگذاری، پارامترهای بسیار مؤثر و حساس بر نیرو خواهند بود.

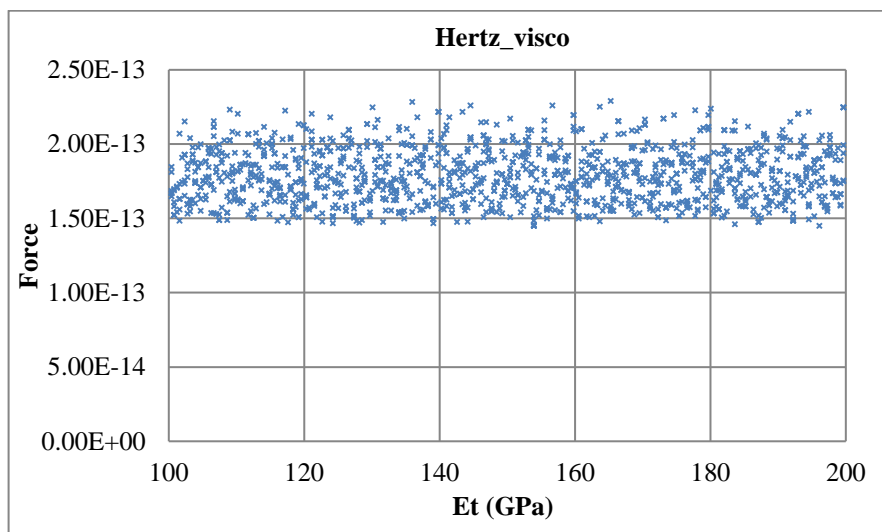


الف) شعاع سوزن

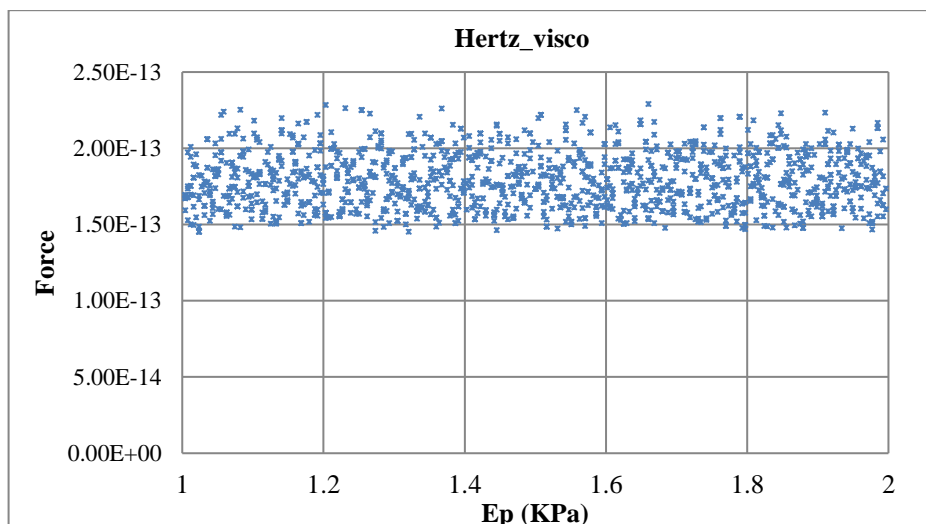
شکل ۶ تأثیر پارامترهای مختلف بر نیرو در مدل تماسی هرتز الف) شعاع سوزن



ب) حجم ذره

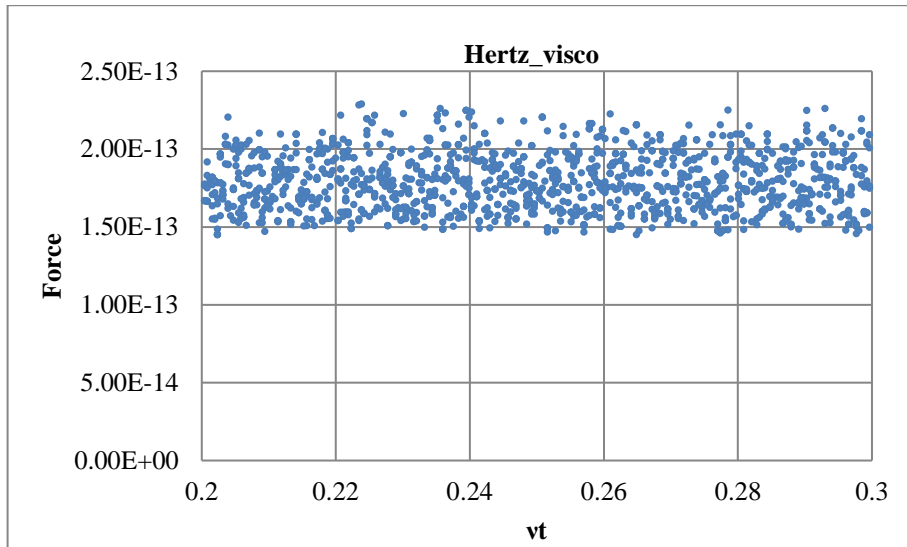


ج) مدول الاستیسیته سوزن

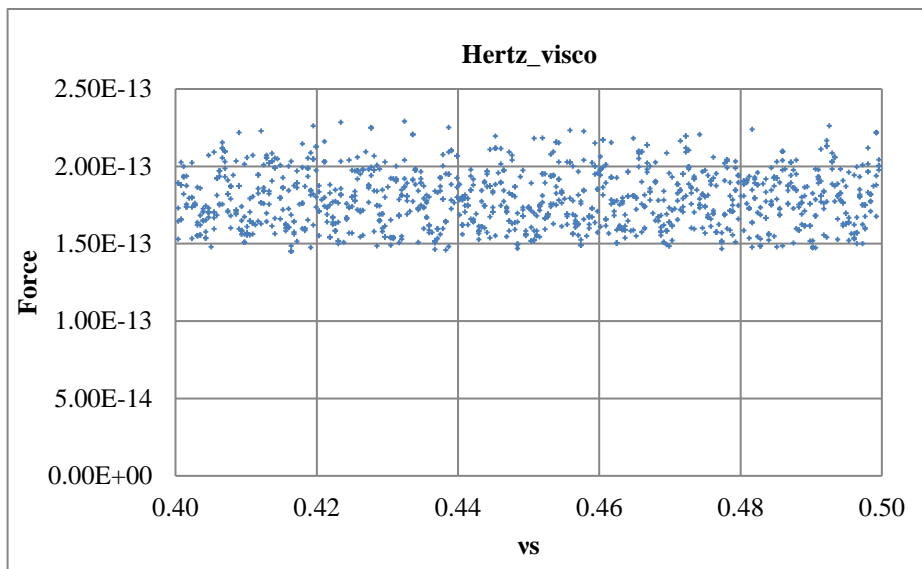


د) جدول الاستیسیته ذره

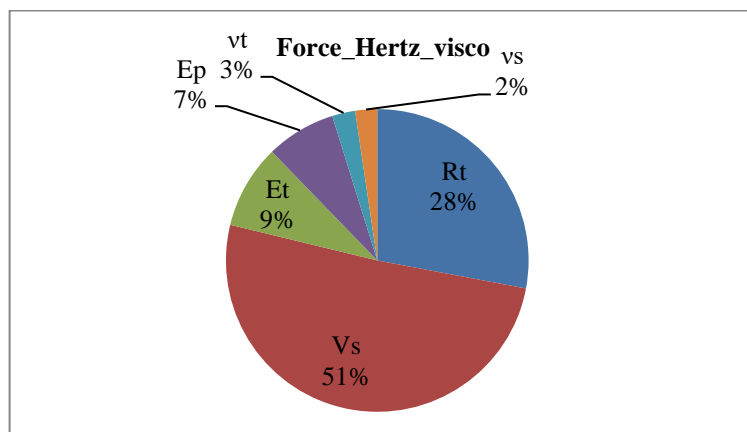
شکل ۶ تأثیر پارامترهای مختلف بر نیرو در مدل تماسی هر تزا (الف) شعاع سوزن ب) حجم ذره، ج) مدول الاستیسیته سوزن، د) جدول الاستیسیته ذره



ه) ضریب پواسون سوزن



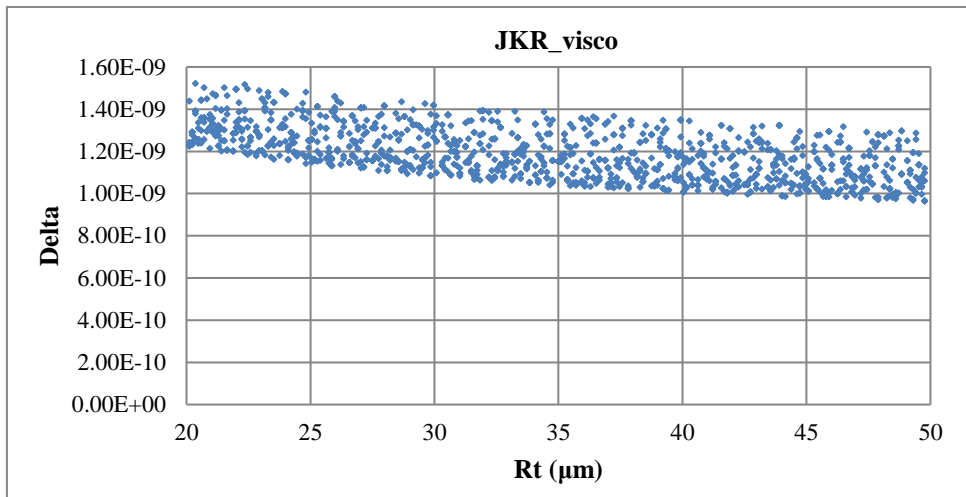
و) ضریب پواسون ذره



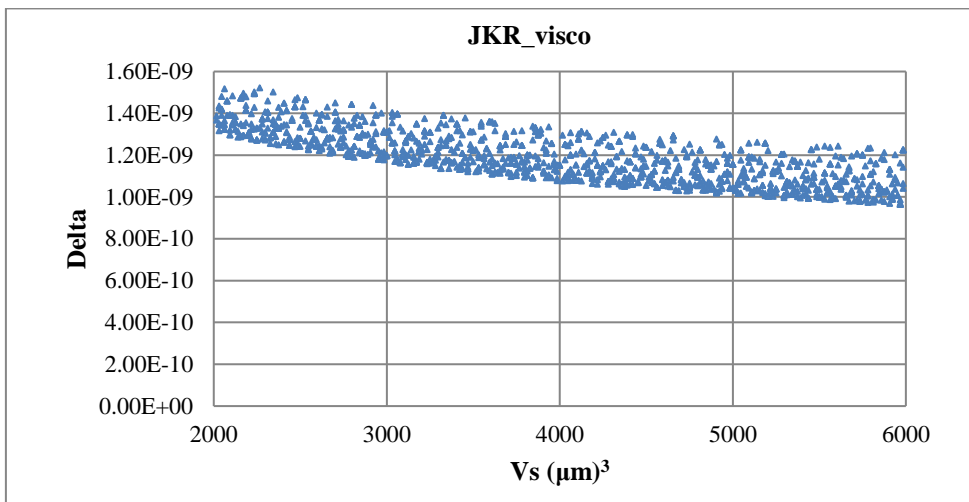
ز) دیاگرام درصد اثرگذاری

شکل ۶ تأثیر پارامترهای مختلف بر نیرو در مدل تماسی هرتز ه) ضریب پواسون سوزن، و) ضریب پواسون ذره، ز) دیاگرام درصد اثرگذاری

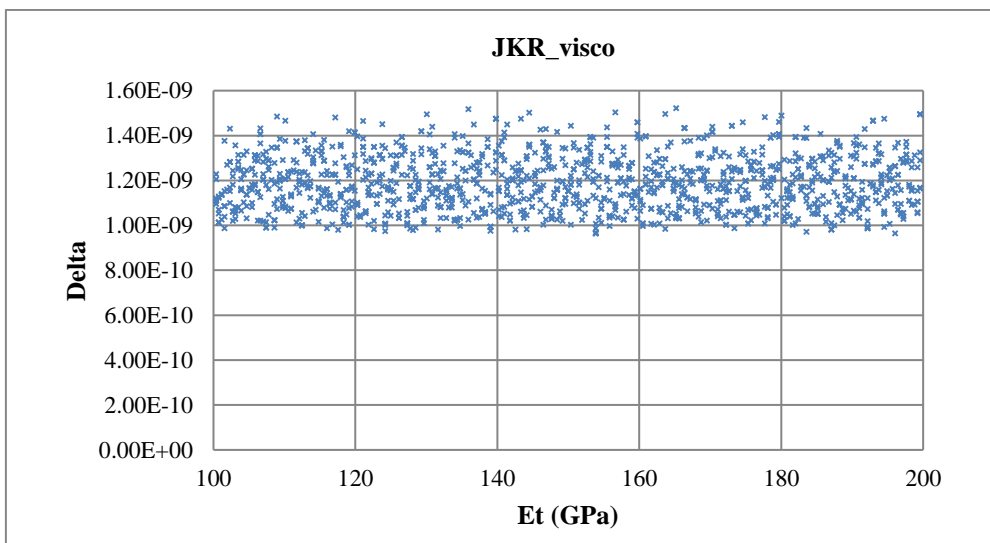
۲-۳- مدل تماسی جی کی آر



الف) شعاع سوزن

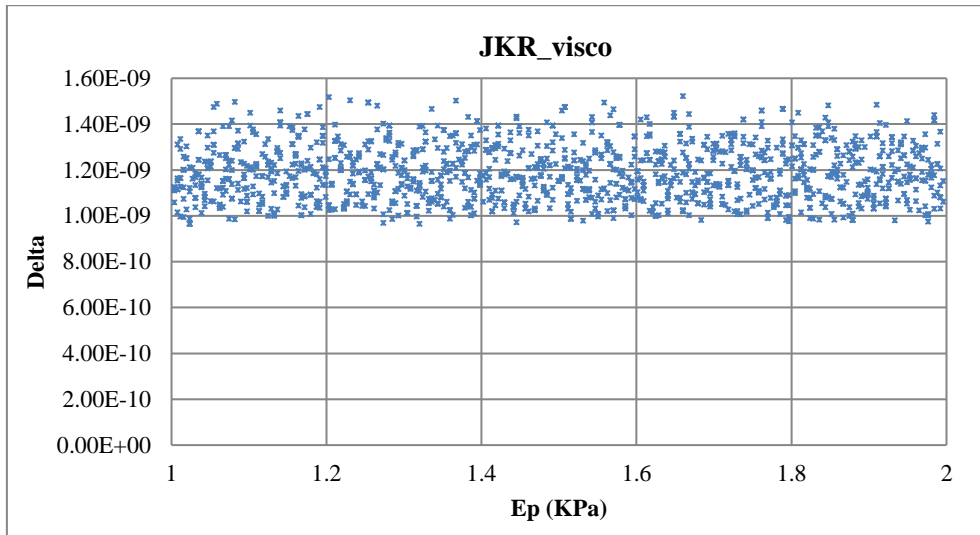


ب) حجم ذره

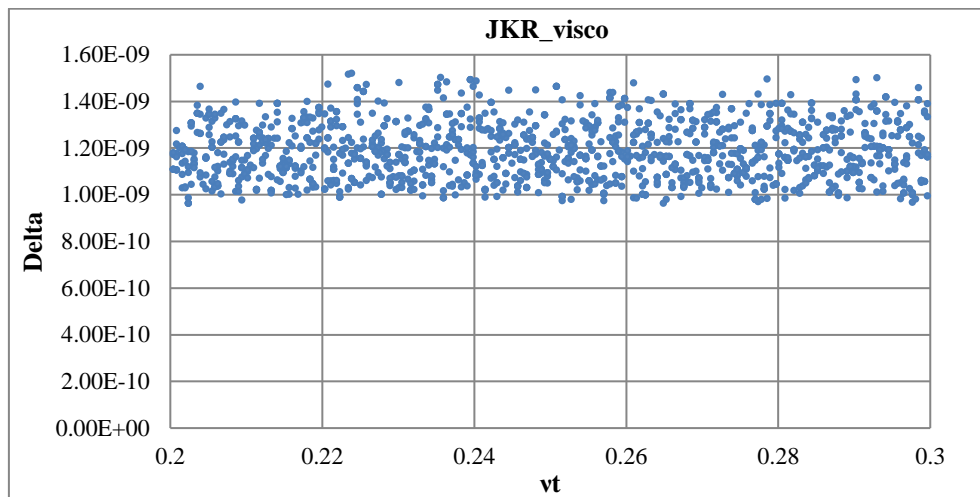


ج) مدول الاستیسیته سوزن

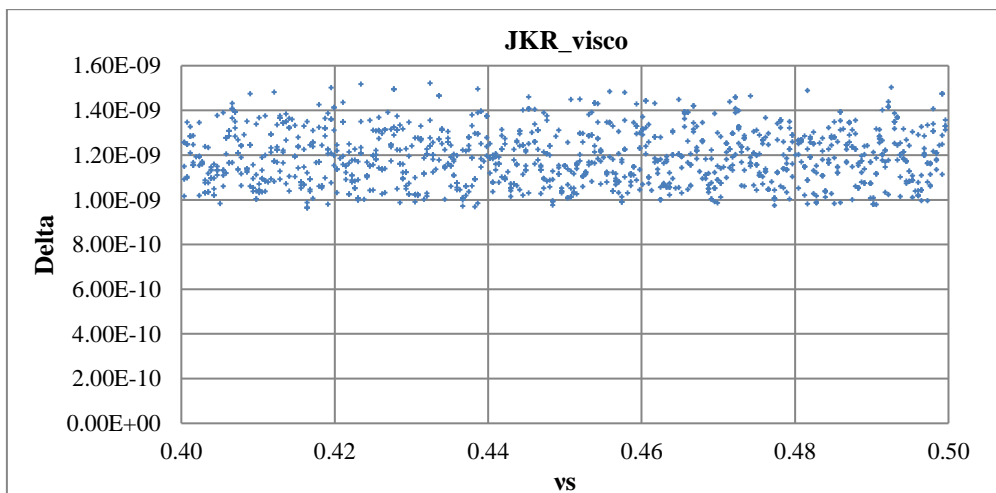
شکل ۷ تأثیر پارامترهای مختلف بر عمق نفوذ در مدل تماسی جی کی آر (الف) شعاع سوزن، (ب) حجم ذره، (ج) مدول الاستیسیته سوزن



(د) مدول الاستیسیته ذره

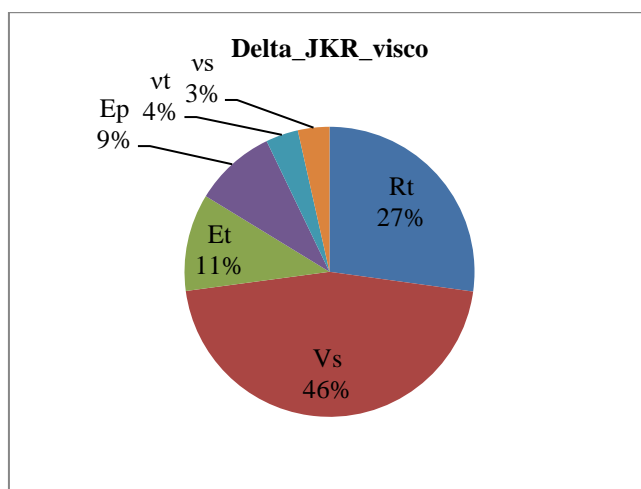


(ه) ضریب پواسون سوزن



(و) ضریب پواسون ذره

شکل ۷ تأثیر پارامترهای مختلف بر عمق نفوذ در مدل تماسی جی کی آر (د) مدول الاستیسیته ذره، (ه) ضریب پواسون سوزن، (و) ضریب پواسون ذره



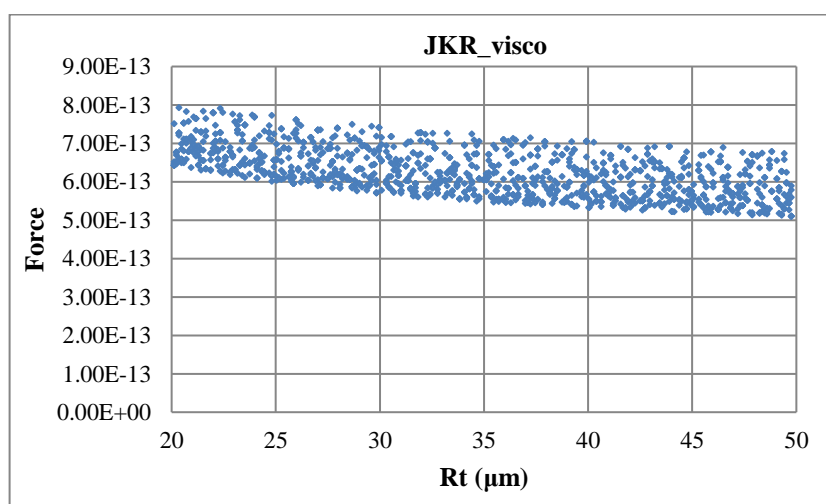
(ز) دیاگرام درصد اثرگذاری

شکل ۷ تأثیر پارامترهای مختلف بر عمق نفوذ در مدل تماسی جی کی آر (ز) دیاگرام درصد اثرگذاری

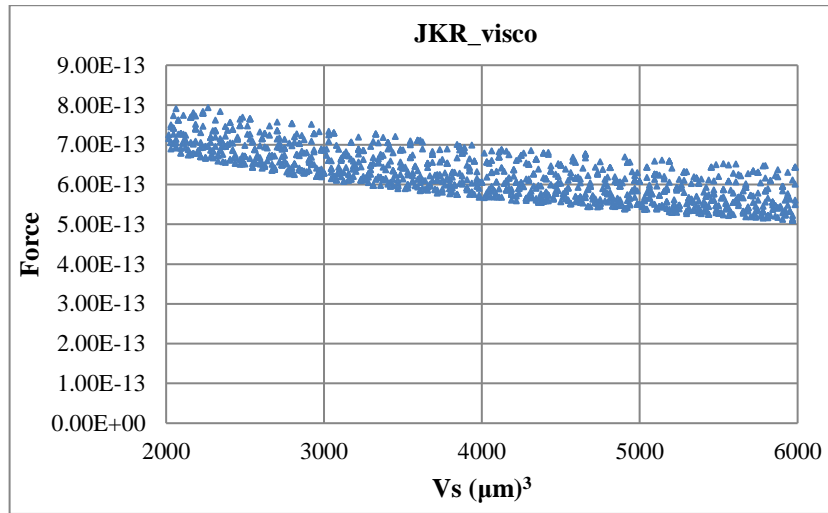
شکل ۷ تأثیر پارامترهای مختلف بر عمق نفوذ را در مدل تماسی جی کی آر نشان می‌دهد. مطابق شکل ۷-الف با افزایش شعاع سوزن، کاهش نسبتاً زیاد در عمق نفوذ را شاهد خواهیم بود. شکل ۷-ب نشان‌گر کاهش زیاد عمق نفوذ با افزایش حجم ذره می‌باشد. شکل ۷-ج افزایش نسبی عمق نفوذ با افزایش مدول الاستیسیته سلول و شکل ۷-د افزایش کم‌تر عمق نفوذ با افزایش مدول الاستیسیته ذره را نشان می‌دهد. با توجه به شکل‌های ۷-ه و ۷-و نیز مشاهده می‌گردد که ضریب پواسون سوزن و ضریب پواسون ذره اثر چندانی بر عمق نفوذ نخواهد داشت.

در شکل ۷-ز مشاهده می‌گردد که حجم ذره با ۴۶ درصد تأثیر و شعاع سوزن با ۲۷ درصد تأثیر، پارامترهای مؤثر بر عمق نفوذ می‌باشند.

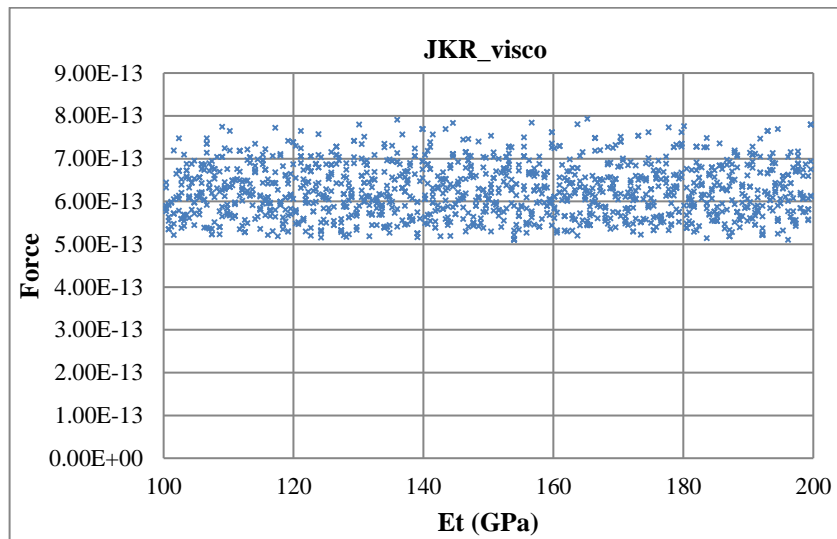
در شکل ۸ نیز تأثیر پارامترهای مختلف بر نیرو در مدل تماسی جی کی آر نشان داده شده است. مطابق شکل ۸-الف و شکل ۸-ب، افزایش شعاع سوزن و حجم ذره، کاهش نسبتاً زیاد در نیرو را منتج خواهد شد. در شکل ۸-ج افزایش نسبی نیرو با افزایش مدول الاستیسیته سلول و در شکل ۸-د نیز افزایش کم‌تر نیرو با افزایش مدول الاستیسیته ذره نشان داده شده است. نمودارهای ۸-ه و ۸-و نیز نشان می‌دهد که ضریب‌های پواسون سوزن و ذره اثر بسیار ناچیزی بر نیرو خواهند داشت. نتایج شکل ۸-ز بیان‌گر این امر است که حجم ذره با ۴۸ درصد اثرگذاری و شعاع سوزن با ۲۶ درصد اثرگذاری، پارامترهای بسیار مؤثر و حساس بر نیرو می‌باشند.



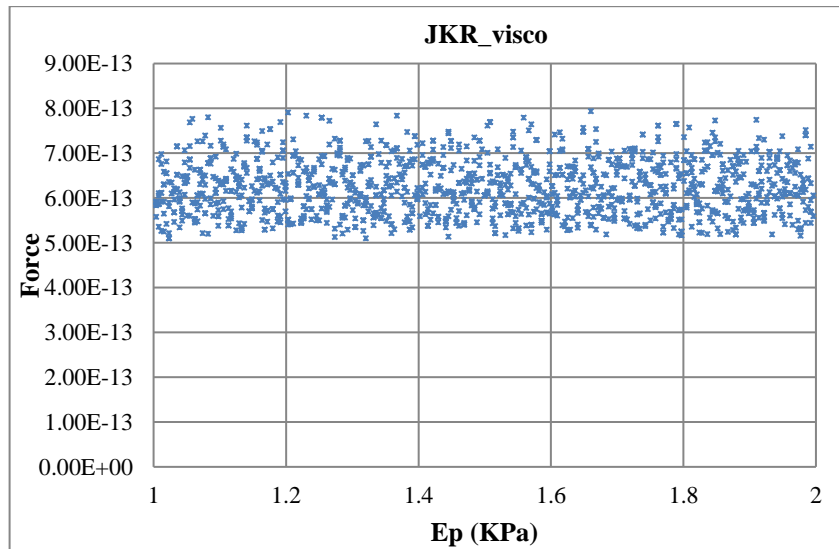
الف) شعاع سوزن



ب) حجم ذره

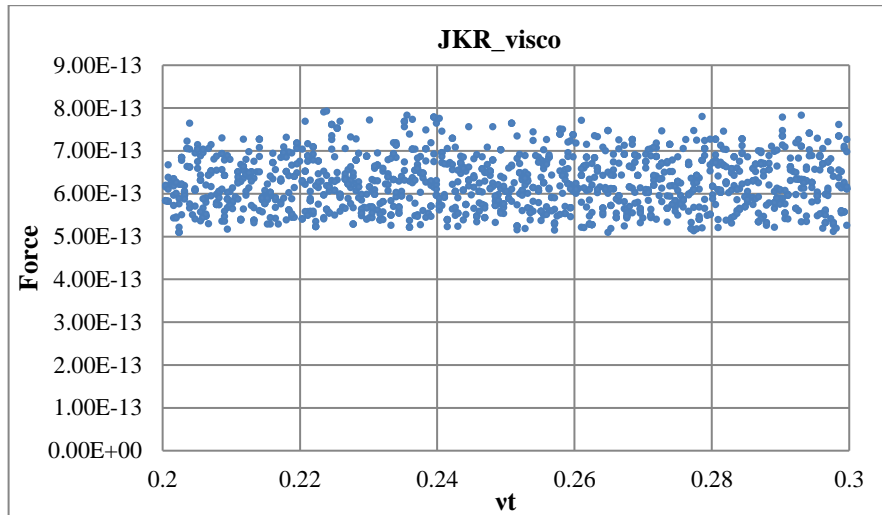


ج) مدول الاستیسیته سوزن

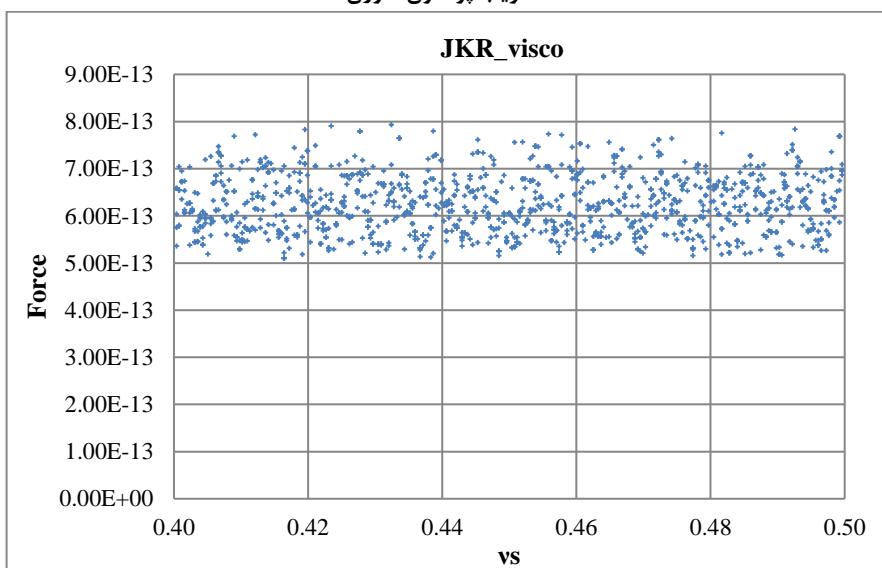


د) مدول الاستیسیته ذره

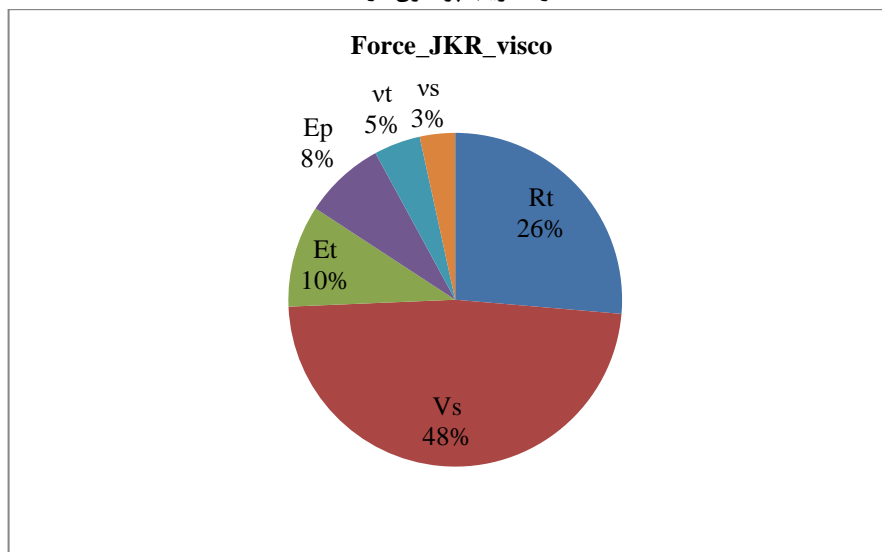
شکل ۸ تأثیر پارامترهای مختلف بر نیرو در مدل تماسی جی کی آر (ب) حجم ذره، (ج) مدول الاستیسیته سوزن، (د) مدول الاستیسیته ذره



ه) ضریب پواسون سوزن



و) ضریب پواسون ذره

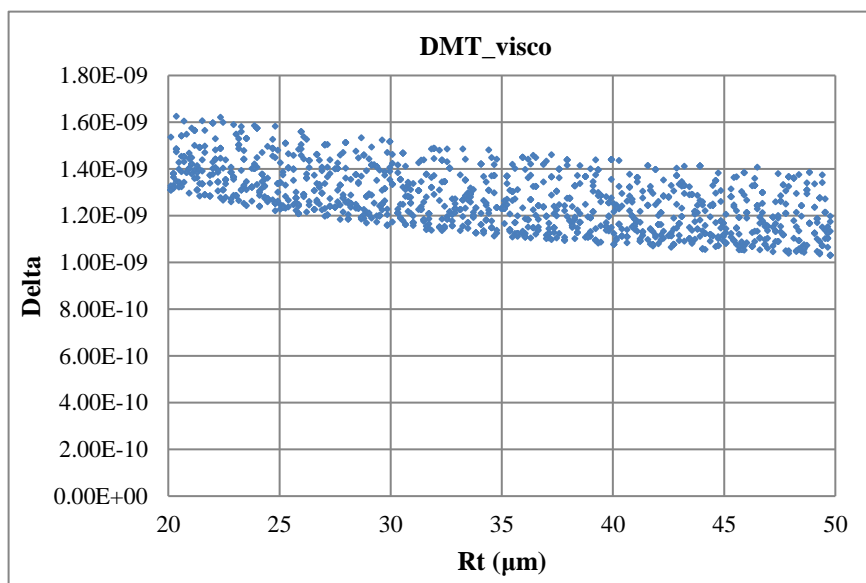


ز) دیاگرام درصد اثرگذاری

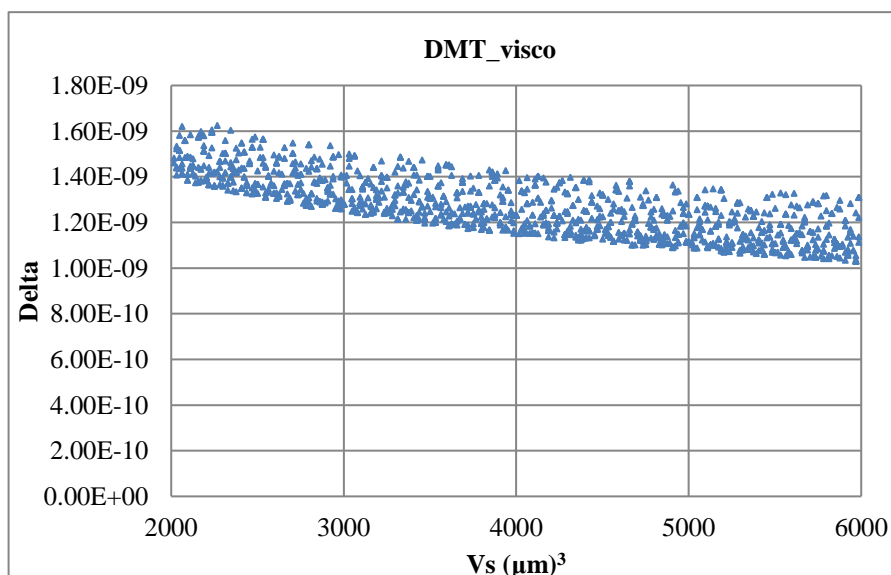
شکل ۸ تأثیر پارامترهای مختلف بر نیرو در مدل تماسی جی کی آر ه) ضریب پواسون سوزن ، و) ضریب پواسون ذره ، ز) دیاگرام درصد اثرگذاری

۳-۳- مدل تماسی دی‌ام‌تی

تأثیر پارامترهای مختلف بر عمق نفوذ را در مدل تماسی دی‌ام‌تی در شکل ۹ نشان داده شده است. بر مبنای نمودارهای (الف) و (ب) با افزایش شعاع سوزن و حجم ذره، کاهش نسبتاً زیاد در عمق نفوذ را شاهد خواهیم بود. شکل (ج) افزایش نسبی عمق نفوذ با افزایش مدول الاستیسته سلول همچنین شکل (د) افزایش ناچیز عمق نفوذ با افزایش مدول الاستیسته ذره را نشان می‌دهد. با توجه به شکل‌های (ه) و (و) نیز می‌توان اظهار داشت که ضریب پواسون سوزن و ضریب پواسون ذره اثر چندانی بر عمق نفوذ نخواهد داشت. در نمودار گرافیکی (ز) مشاهده می‌گردد که حجم ذره با ۴۲ درصد تأثیر و شعاع سوزن با ۳۲ درصد تأثیر، پارامترهای مؤثر بر عمق نفوذ می‌باشند.

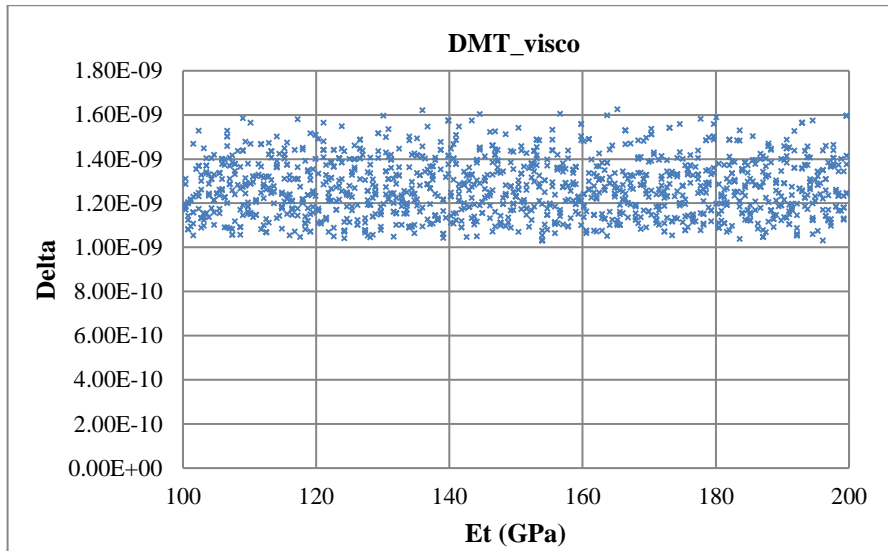


الف) شعاع سوزن

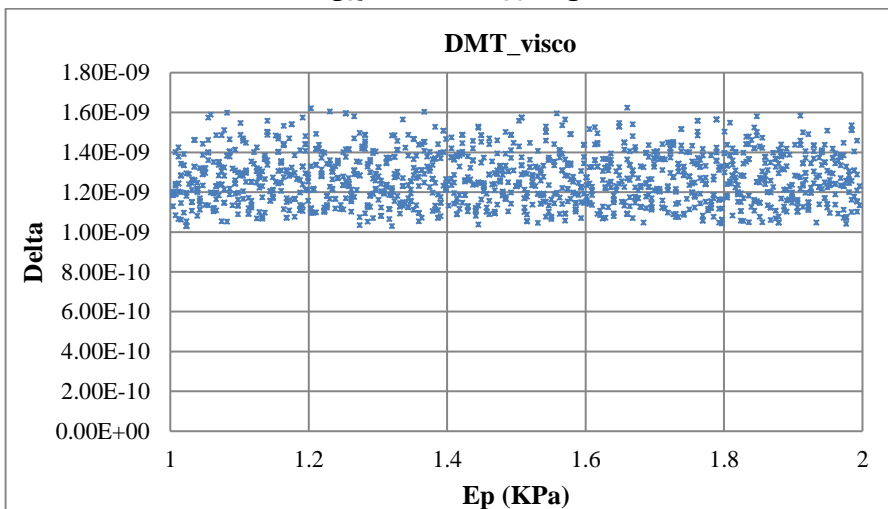


ب) حجم ذره

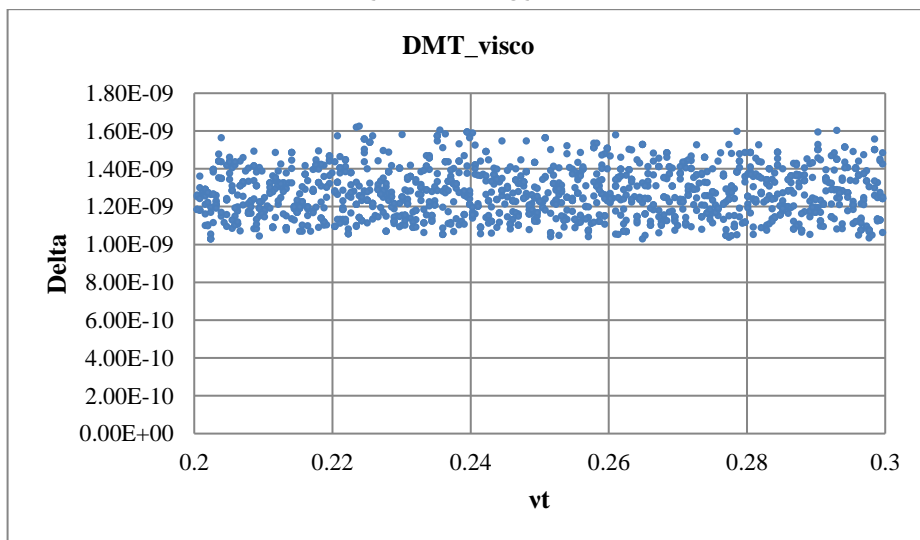
شکل ۹ تأثیر پارامترهای مختلف بر عمق نفوذ در مدل تماسی دی‌ام‌تی (الف) شعاع سوزن، (ب) حجم ذره



ج) مدول الاستیسیته سوزن

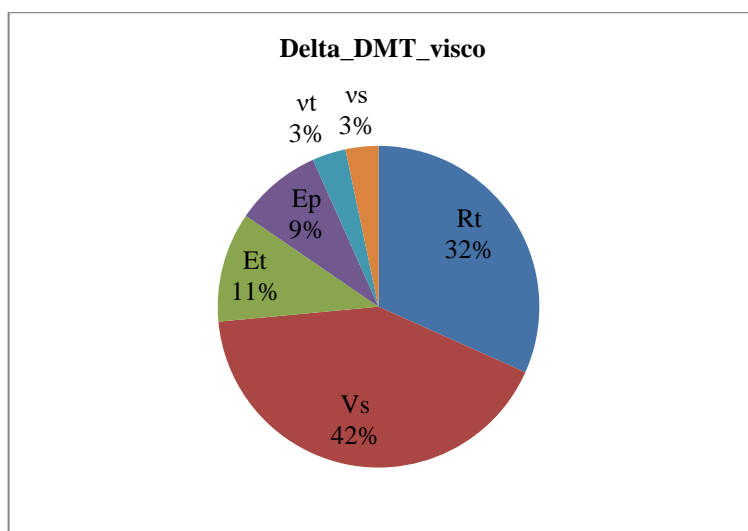


د) مدول الاستیسیته ذره



ه) ضریب پواسون سوزن

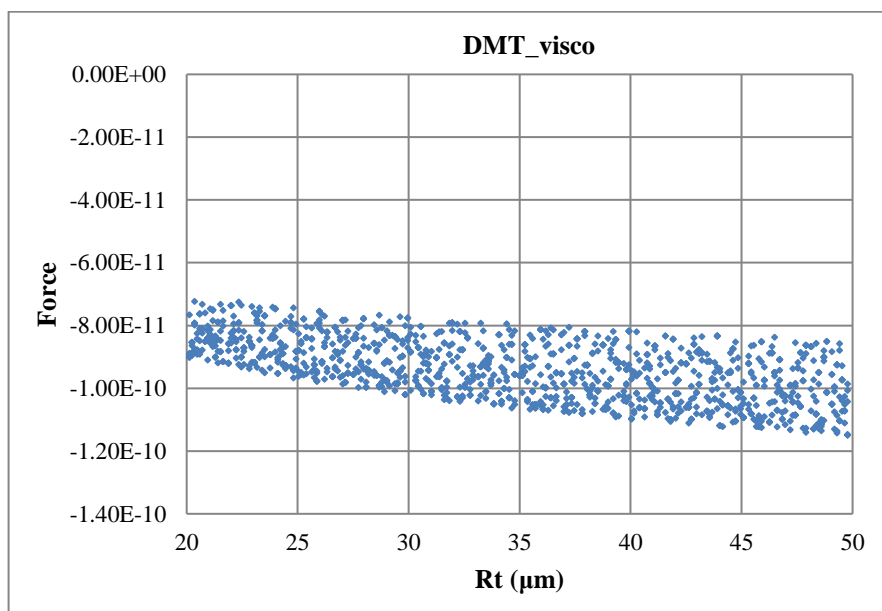
شکل ۹ تأثیر پارامترهای مختلف بر عمق نفوذ در مدل تماسی دیام تی ج) مدول الاستیسیته سوزن، د) مدول الاستیسیته ذره، ه) ضریب پواسون سوزن



شکل ۹ تأثیر پارامترهای مختلف بر عمق نفوذ در مدل تماسی دی ام تی (ز) دیاگرام درصد اثرگذاری

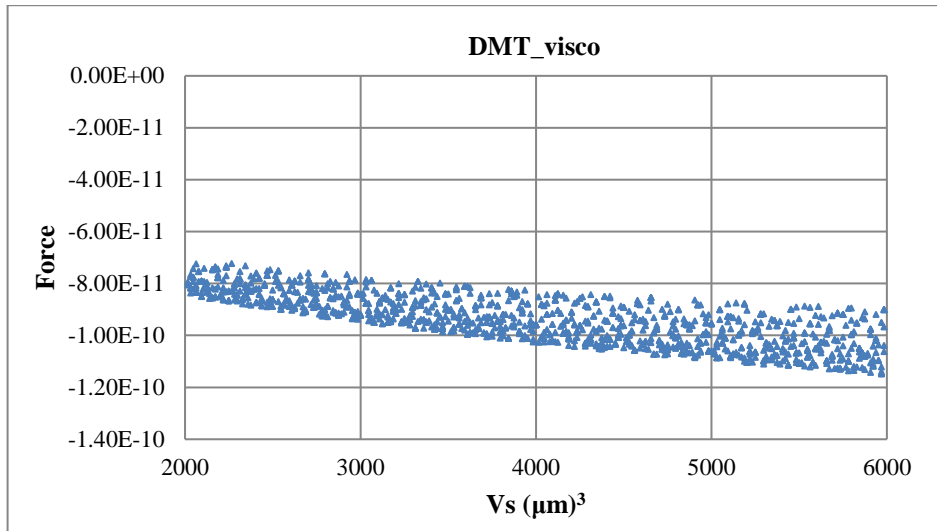
تأثیر پارامترهای مختلف بر نیرو در مدل تماسی دی ام تی در شکل ۱۰ نشان داده شده است. مطابق نمودار (الف) افزایش شعاع سوزن، کاهش نسبتاً زیاد در نیرو را منتج خواهد شد. در نمودار (ب) نیز مشاهده می‌گردد که افزایش حجم ذره همراه با کاهش زیاد نیرو می‌باشد. افزایش نسبی نیرو با افزایش مدول الاستیسته سلول و افزایش مدول الاستیسته ذره به ترتیب در نمودار (ج) و (د) نشان داده شده است. بر مبنای نمودارهای (ه) و (و) می‌توان اظهار نمود که ضریب‌های پیواسون سوزن و ذره اثر بسیار ناچیزی بر نیرو خواهند داشت.

شکل ۱۰-ز نیز درصد اثرگذاری شش پارامتر مورد بررسی بر عمق نفوذ را مطابق با نتایج آنالیز حساسیت بررسی شده به روش ای-فست، نشان می‌دهد. در این شکل مشاهده می‌گردد که حجم ذره با ۴۲ درصد تأثیر و شعاع سوزن با ۳۲ درصد تأثیر، پارامترهای مؤثر بر عمق نفوذ می‌باشند. با مشاهده شکل ۱۰-ز می‌توان بیان نمود که حجم ذره با ۴۴ درصد اثرگذاری و شعاع سوزن با ۳۱ درصد اثرگذاری، پارامترهای بسیار مؤثر و حساس بر نیرو می‌باشند.

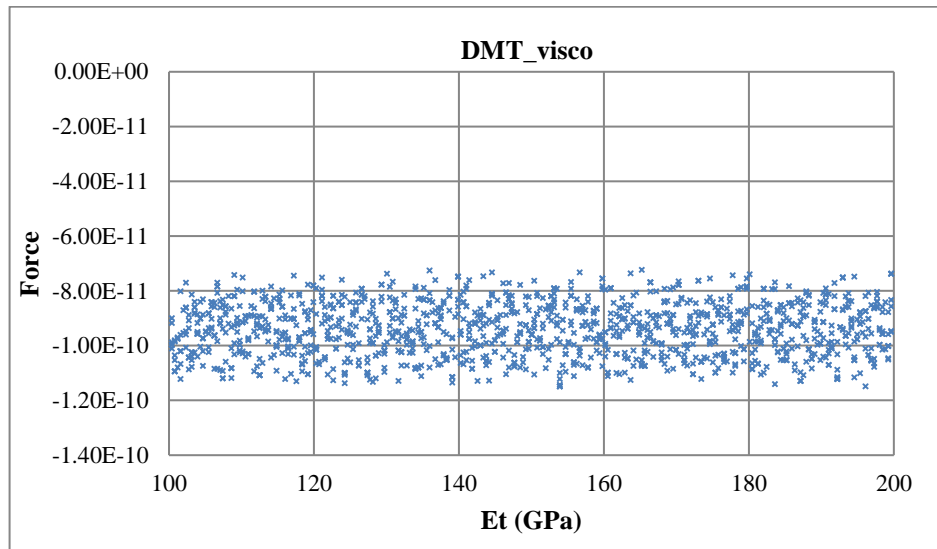


(الف) شعاع سوزن

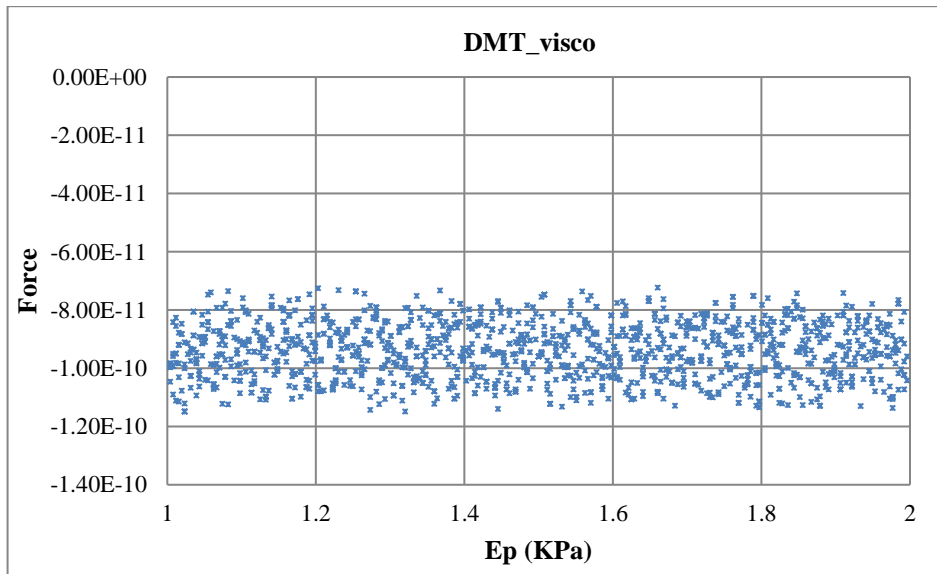
شکل ۱۰ تأثیر پارامترهای مختلف بر نیرو در مدل تماسی دی ام تی (الف) شعاع سوزن



ب) حجم ذره

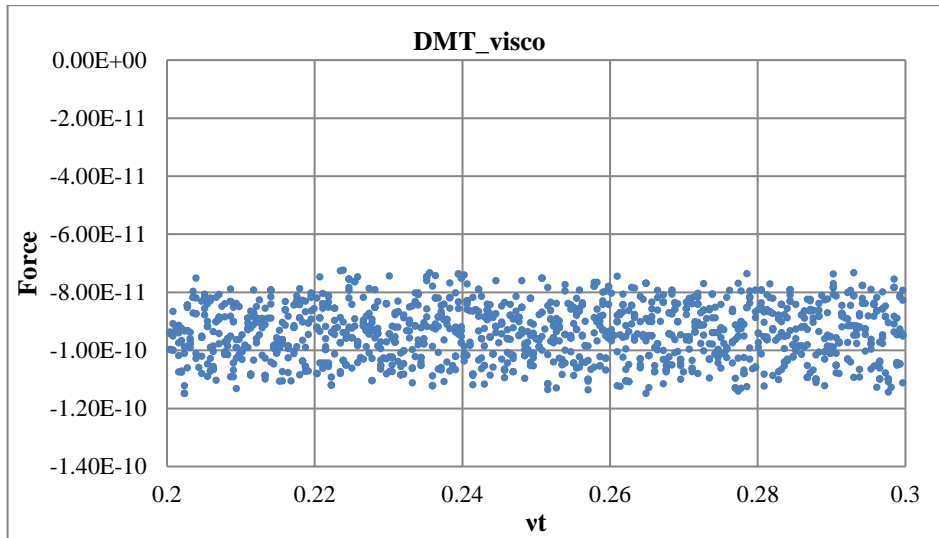


ج) مدول الاستیسیته سوزن

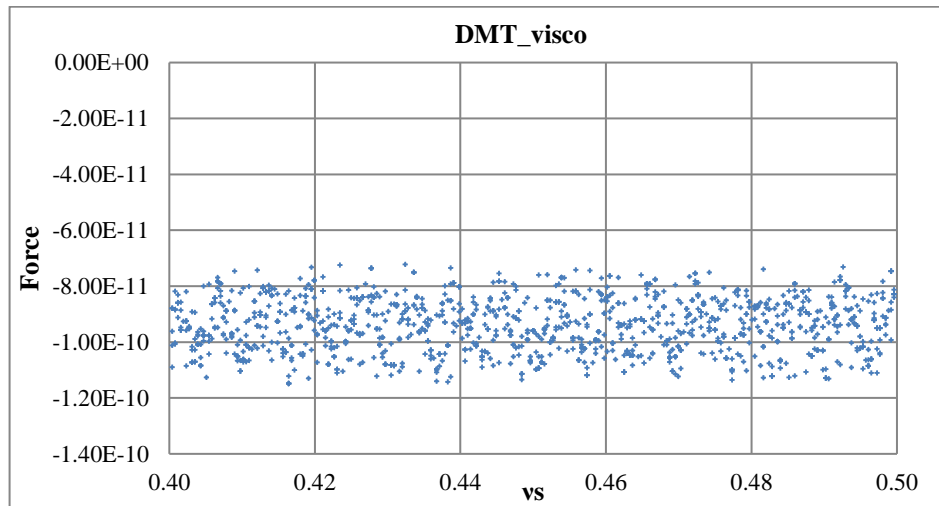


د) مدول الاستیسیته ذره

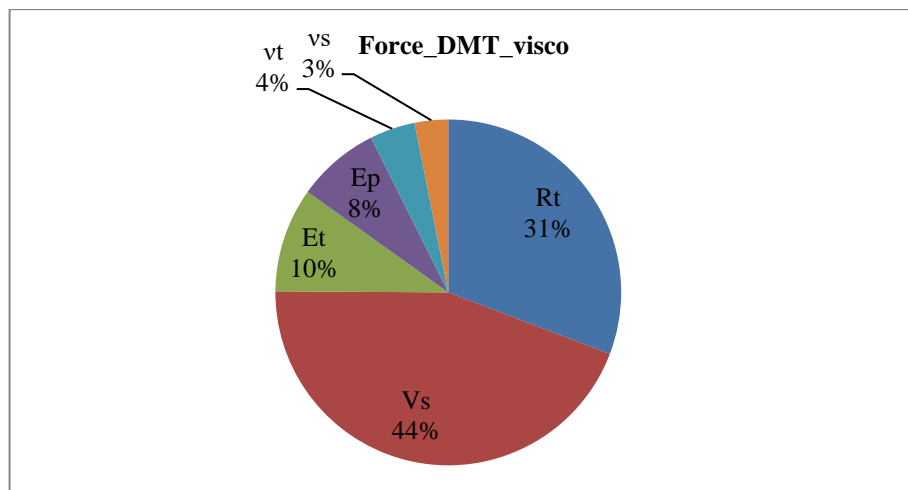
شکل ۱۰ تأثیر پارامترهای مختلف بر نیرو در مدل تماسی دی ام تی (ب) حجم ذره، (ج) مدول الاستیسیته سوزن، (د) مدول الاستیسیته ذره



ه) ضریب پواسون سوزن



و) ضریب پواسون ذره



ز) دیاگرام درصد اثرگذاری

شکل ۱۰ تأثیر پارامترهای مختلف بر نیرو در مدل تماسی دی ام تی ب) حجم ذره، ج) مدول الاستیسیته سوزن، د) مدول الاستیسیته ذره

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش مدل های تماسی شامل مدل های هرتز، جی کی آر و دی ام تی در محیط مایع، مورد بررسی و توسعه قرار گرفته است. در بخش آخر این پژوهش به بررسی میزان اثرگذاری ورودی های مختلف بر خروجی های مورد نظر به صورت کیفی و کمی پرداخته شده است. لازم به بیان است که تمامی صحت سنجی های این تحقیق با استفاده از آنالیز حساسیت به روش ای-فست صورت گرفته است.

با هدف تحلیل مدل های تماسی تأثیر پارامترهای ورودی که عبارتند از شعاع سوزن، حجم ذره، مدول الاستیسیته سوزن، مدول الاستیسیته ذره، ضریب پواسون سوزن و ضریب پواسون ذره در فرآیند نانومنیپولیشن بر دو پارامتر خروجی نیرو و عمق نفوذ مورد تحقیق قرار گرفته است.

خلاصه نتایج حاصل گردیده از این پژوهش به شرح زیر است :

۱. حجم ذره به ترتیب در مدل هرتز با ۴۹ و ۵۱ درصد اثرگذاری، پارامتر حساس تأثیرگذار بر عمق نفوذ و نیرو می باشد.
 ۲. حجم ذره به ترتیب در مدل جی کی آر با ۴۶ و ۴۸ درصد پارامتر حساس تأثیرگذار بر عمق نفوذ و نیرو می باشد.
 ۳. حجم ذره به ترتیب در مدل دی ام تی با ۴۲ و ۴۴ درصد اثرگذاری، پارامتر حساس تأثیرگذار بر عمق نفوذ و نیرو می باشد.
- در راستای تحقق بهره‌وری و توسعه فرآیند نانو منیپولیشن سایر مدل های تماسی، پارامترهای ابعادی و پارامترهای محیطی، آنالیز حساسیت با سایر روش های آماری و بررسی اشکال متفاوت نانو ذره توصیه می گردد.

۵- مراجع

- [1] Habibnejad Korayem M, Rastegar Z, Taheri M. Application of Johnson-Kendall-Roberts model in nanomanipulation of biological cell: air and liquid environment. *Micro& Nano Letters*. 2012; 7(6):576-580.
- [2] Habibnejad Korayem M, Rastegar Z, Taheri M. Sensitivity Analysis of Nano-Contact Mechanics Models in Manipulation of Biological Cell. *Nanoscience and Nanotechnology*. 2012; 2(3):49-56.
- [3] Habibnejad Korayem M, Rastegar Z. Application of Nano-Contact Mechanics Models in Manipulation of Biological Nano-Particle FE simulation. *International Journal of Nanoscience and Nanotechnology*. 2012; 8(1):35-50.
- [4] Habibnejad Korayem M, Khaksar H, Taheri M. 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*. 2013; 114:183715.
- [5] Hui C Y, Baney J M. Contact Mechanics and Adhesion of Viscoelastic Spheres. *Langmuir*. 1998; 14:6570-6578.
- [6] Chaudhary M. Adhesive contact of cylindrical lens and a flat sheet. *Journal of Applied Physics*. 1996; 80(1):30-37.
- [7] Resch R, Lewis D, Meltzer S, Montoya M, Koel B E, Madhukar A B. Manipulation of gold nanoparticles in liquid environments using scanning force microscopy. *Ultramicroscopy*. 2000; 82:135-139.
- [8] Chu Y Sh, Dufour S, Thiery J P, Perez E, Pincet, F. Johnson-Kendall-Roberts theory applied to living cells. *Physical review letters*. 2005; 94(2):1-4.
- [9] McNamee C E, Pyo N, Tanaka S, Vakarelski I U, Kanda Y, Higashitani K. Parameters affecting the adhesion strength between a living cell and a colloid probe when measured by the atomic force microscope. *Journal of Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*. 2006; 48:176-182.
- [10] Habibnejad Korayem M, Geramizadeh M. DNA manipulation in biological liquid environment based on atomic force microscopy. *Nanoscience and Nanotechnology*. 2012; 2(4):109-115.

- [11] Habibnejad Korayem M, Hezaveh H B, Taheri M. Dynamic modeling and simulation of rough cylindrical micro/nanoparticle manipulation with atomic force microscopy. *Microscopy and Microanalysis*. 2014; 20(6):1692-1707.
- [12] Habibnejad Korayem M, Taheri M, Rastegar Z. Sobol method application in sensitivity analysis of LuGre friction model during 2D manipulation. *Scientia Iranica*. 2014; 21(4):1461-1469.
- [13] Habibnejad Korayem M, Khaksar H, Taheri M. Effective Parameters in Contact Mechanic for Micro/nano Particle Manipulation Based on Atomic Force Microscopy. *International Journal of Nanoscience and Nanotechnology*. 2015; 11(2):83-92.
- [14] Habibnejad Korayem M, Mirmohammad S A, Saraee M B. Investigating the effect of surface roughness on the critical sliding and rolling forces of cylindrical nanoparticles based on the multi-asperity contact models. *Journal of Applied Physics*. 2015; 120(4):1511–1528.
- [15] Habibnejad Korayem M, Khaksar H, Nouhi HefzAbad R, Taheri M. Simulation of soft bacteria contact to be applied in nanomanipulation. *Modares Mechanical Engineering*. 2015; 14: 227-234.
- [16] Habibnejad Korayem M, Mahmoodi Z, Taheri M, Saraee M B. Three-dimensional modeling and simulation of the AFM-based manipulation of spherical biological micro/nanoparticles with the consideration of contact mechanics theories. *Proc IMechE Part K:J Multi-body Dynamics*. 2015; 229(4):1–13.
- [17] Derjaguin, Muller, Toporov. The Derjaguin, Muller, and Toporov (DMT) adhesion theory. *Encyclopedia of Tribology*. 1975; :3560–3565.