



## Numerical Investigation of the Effect of Shot Peening Parameters on the Residual Stresses Using a Random Three-dimensional Finite Element Model

Kamran Rahmani<sup>1</sup>, Majid Alitavoli<sup>2\*</sup>

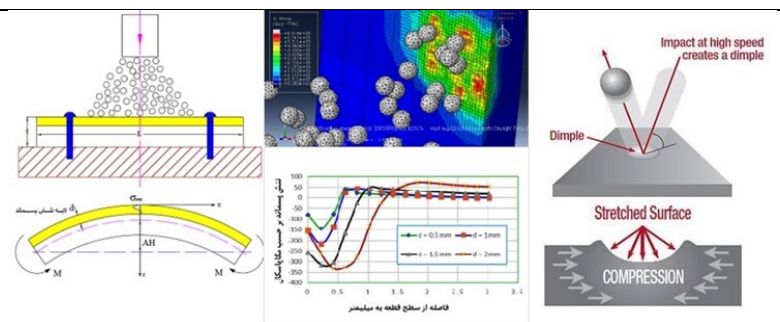
<sup>1</sup> Ph.D. Student, Faculty of Mechanical Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran

<sup>2</sup> Associate Professor, Faculty of Mechanical Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran

### HIGHLIGHTS

- Application of shot pinning in increasing the fatigue life of parts
- Optimal values of shot peening parameters
- Shot peening intensity and saturation curve
- 3D random finite element model
- Residual stress profiles of shot peening

### GRAPHICAL ABSTRACT



### ARTICLE INFO

Article history:

Article Type: Research paper

Received: 17 August 2023

Received in revised form: 10 September 2023

Accepted: 10 October 2023

Available online: 31 October 2023

\*Correspondence: tavoli@guilan.ac.ir

How to cite this article:

K. Rahmani, M. Alitavoli. Numerical investigation of the effect of shot peening parameters on the residual stresses using a random three-dimensional finite element model. Journal of Aerospace Mechanics. 2024; 20(1):77-88.

Keywords:

- Shot peening
- Compressive residual stress
- Random finite element model
- Shot peening intensity
- Saturation curve

### ABSTRACT

Shot peening is a cold working process that is used to increase the fatigue life of metal parts by creating compressive residual stress on their surface. The experimental investigation of the parameters of this process is very difficult and expensive, therefore, the finite element method is usually used to simulate and investigate the parameters of this process. However, most of the existing finite element models are not able to describe the real and random movement of the flow of particles and are also limited in terms of modeling the number of particles. Therefore, in this research, in the first stage, a finite element model of the shot pinning process is presented, which is capable of simulating the random and numerous states of this process, and in the next stage, the effect of different parameters of this process such as the size, velocity and angle of throwing the balls on the residual stress is investigated. The result of these investigations led to finding the optimal values of these parameters, so that the optimal value for the diameter of the shots was 1.5 mm, for the velocity of the shots was equal to 100 m/s and for the throwing angle of the shots was equal to 90 degrees. Also, the increase in the diameter of the shots had the greatest effect and the increase in the launch angle of the shots had the least effect in increasing the amount and depth of the residual stress. Also, we were able to numerically measure the important parameter "Shot peening intensity" which is usually measured experimentally by Almen gauge using this model. The obtained results were in good agreement with the experimental results obtained from the work of other researchers and therefore the validity of the presented model can be assured.

This is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license.



## بررسی عددی تأثیر پارامترهای فرایند شات‌پینینگ بر توزیع تنش‌های پسماند با استفاده از مدل المان محدود سه‌بعدی تصادفی

کامران رحمانی<sup>۱</sup>، مجید علی طاوولی<sup>۲\*</sup>

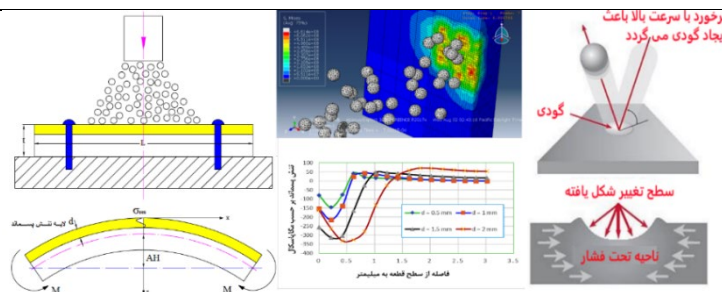
<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

<sup>۲</sup> دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

### برجسته‌ها

- کاربرد شات‌پینینگ در افزایش عمر خستگی قطعات
- منحنی تنش پسماند شات‌پینینگ
- مدل اجزای محدود سه‌بعدی تصادفی
- شدت شات‌پینینگ و منحنی اشباع
- مقادیر بهینه پارامترهای شات‌پینینگ

### چکیده گرافیکی



### مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۲۶

بازنگری: ۱۴۰۲/۰۶/۰۵

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۱۸

ارائه برخط: ۱۴۰۲/۰۸/۰۹

\*نویسنده مسئول:

tavoli@guilan.ac.ir

کلیدواژه‌ها:

شات‌پینینگ

اجزای محدود تصادفی

تنش پسماند

منحنی اشباع

شدت شات‌پینینگ

### چکیده

شات‌پینینگ یک فرایند کار سرد است که برای افزایش عمر خستگی قطعات فلزی از طریق ایجاد تنش پسماند فشاری در سطح آن‌ها بکار می‌رود. بررسی تجربی پارامترهای این فرایند بسیار مشکل و پرهزینه است؛ لذا معمولاً از روش اجزای محدود برای شبیه‌سازی و بررسی پارامترهای این فرایند استفاده می‌شود. باین‌حال، اکثر مدل‌های اجزای محدود موجود قادر به توصیف حرکت تصادفی و واقعی جریان ساچمه‌ها نیستند و از نظر مدل‌سازی تعداد ساچمه‌ها نیز محدودیت دارند؛ بنابراین در این تحقیق در مرحله اول یک مدل اجزای محدود از فرایند شات‌پینینگ ارائه می‌گردد که قادر به شبیه‌سازی حالت تصادفی و پر تعداد این فرایند است و در مرحله بعد توسط آن تأثیر پارامترهای مختلف این فرایند مانند اندازه، سرعت و زاویه پرتاب ساچمه‌ها بر تنش پسماند بررسی می‌گردد. مطابق با نتایج به‌دست‌آمده، مقادیر بهینه برای اندازه قطر ساچمه‌ها برابر ۱/۵ میلی‌متر، برای سرعت پرتاب ساچمه‌ها برابر با ۱۰۰ متر بر ثانیه و برای زاویه پرتاب ساچمه‌ها برابر با ۹۰ درجه حاصل گردید. همچنین افزایش قطر ساچمه‌ها بیشترین و افزایش زاویه پرتاب ساچمه‌ها کمترین تأثیر را در افزایش مقدار و عمق تنش پسماند داشتند. در ضمن پارامتر مهم شدت شات‌پینینگ که معمولاً از طریق تجربی و توسط گیج آلمن اندازه‌گیری می‌شود، توسط این مدل و به‌صورت عددی اندازه‌گیری گردید. نتایج به‌دست‌آمده تطابق خوبی با نتایج تجربی حاصل از کار دیگر محققین داشت و لذا می‌توان از اعتبار مدل ارائه‌شده اطمینان حاصل نمود.

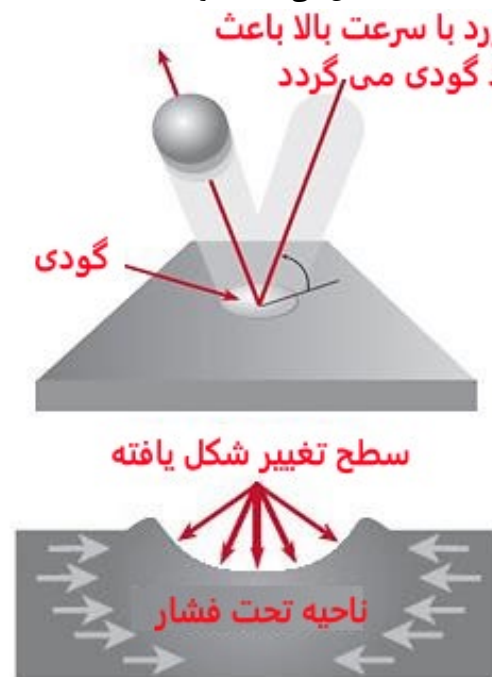
## ۱- مقدمه

در صنعت مورد استفاده قرار گیرد. اثربخشی عملیات شات‌پینینگ تا حد زیادی به پارامترهای «شدت شات‌پینینگ» و «پوشش‌دهی سطح» آن بستگی دارد. شدت شات‌پینینگ به مقدار انرژی جنبشی منتقل شده از جریان ساچمه‌ها به قطعه هدف بستگی دارد و برای اندازه‌گیری آن از روش آلمن استفاده می‌شود [۴]. در این روش ارتفاع قوس حاصل از شات کردن نوارهای فولادی استاندارد، معروف به نوارهای آلمن، اندازه‌گیری می‌شود که بیانگر شدت شات‌پینینگ است. از سوی دیگر، پوشش‌دهی سطح، به‌صورت نسبت سطحی که به‌وسیله گودال‌های ناشی از برخورد ساچمه‌ها به وجود می‌آید به مساحت کل سطح قطعه تعریف می‌شود. میزان پوشش‌دهی معمولاً به‌صورت چشمی و با استفاده از ذره‌بین تخمین زده می‌شود [۵].

در ادامه کارهای انجام شده توسط محققان مختلف در این زمینه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

الحسنی و همکارانش [۲] یک مدل اجزای محدود سه‌بعدی نیم دایره‌ای را برای شبیه‌سازی برخورد تک‌شات و برخوردهای چندگانه ارائه کردند. آن‌ها یک تابع کسینوسی را برای بیان نیم‌رخ تنش القایی در نظر گرفتند. کوبایشی و همکاران [۶] مکانیسم ایجاد تنش پسماند فشاری توسط شات‌پینینگ را بررسی کردند. آن‌ها با انجام تست‌های استاتیک و دینامیک توسط یک شات بر روی یک ورق فولادی، توزیع تنش پسماند در اطراف محل برخورد ساچمه‌ها را به دست آوردند. مگوید و همکاران [۷] یک مدل اجزای محدود سه‌بعدی ارائه کردند که می‌توانست برخورد یک و دو شات صلب را با قطعه فلزی شبیه‌سازی نماید. آن‌ها همچنین اثر تغییر سرعت، اندازه و فاصله بین دو ساچمه برخوردکننده را بر روی توزیع تنش پسماند بررسی کردند. گیاگلیانو و همکاران [۸] یک مدل اجزای محدود برای پیش‌بینی تنش‌های پسماند ناشی از شات‌پینینگ در یک قطعه فلزی و ارتباط این تنش‌ها با شدت آلمن را ارائه دادند. شیفر و همکاران [۹] از یک مدل تقارن محوری برای شبیه‌سازی پروفیل تنش‌های پسماند، استفاده کردند. در مدل آن‌ها قطعه هدف خواص الاستیک - پلاستیک داشت و توسط آن اثر پارامترهای مختلف شات‌پینینگ بر پروفیل تنش پسماند را بررسی کردند.

شات‌پینینگ یک فرایند کار سرد است که برای افزایش عمر خستگی قطعات فلزی از طریق ایجاد تنش پسماند فشاری در سطح آن‌ها بکار می‌رود. در این روش سطح قطعه موردنظر با تعداد زیادی قطعه کوچک کروی که ساچمه یا شات نامیده می‌شوند بمباران می‌شود. هر ساچمه که به سطح قطعه برخورد می‌کند همانند یک چکش خیلی کوچک عمل کرده و موجب ایجاد یک فرورفتگی یا گودی کوچک بر روی سطح قطعه می‌گردد و ماده‌ای از قطعه که زیر این سطح تغییرشکل یافته قرار دارد سعی می‌کند سطح را به شکل اولیه خودش برگرداند. در نتیجه به‌واسطه همپوشانی فرورفتگی‌های ایجاد شده توسط برخورد ساچمه‌های دیگر، یک‌لایه یکنواخت فشاری در سطح و زیر سطح قطعه ایجاد می‌گردد. شکل ۱ فرایند شات‌پینینگ را به‌صورت شماتیک نمایش می‌دهد [۱ و ۲].



شکل (۱): شکل شماتیک فرایند شات‌پینینگ [۳].

به‌واسطه وجود این تنش‌های پسماند فشاری، ساختار دانه‌بندی سطح جسم در معرض تنش فشاری قرار گرفته که این مسئله موجب به تأخیر افتادن رشد ترک و در نتیجه افزایش عمر خستگی قطعات فلزی می‌گردد. هزینه پایین و سهولت استفاده از این روش باعث گردیده تا به‌طور وسیعی

ایجاد شده توسط شات‌پینینگ را در کامپوزیت ماتریس تیتانیومی از طریق روش اجزای محدود و روش تجربی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها از برنامه LS-DYNA برای مدل‌سازی استفاده کردند. نتایج عددی و تجربی آن‌ها تطابق خوبی با یکدیگر داشت.

یولا و همکاران [۱۸] از نرم‌افزار LS-DYNA برای شبیه‌سازی برخورد ساچمه‌ها به صفحه آلیاژ آلومینیوم 2618-T61 استفاده کردند. آن‌ها اثرات سرعت و اندازه ساچمه‌ها بر تنش پسماند را بدون در نظر گرفتن حرکت تصادفی پرتاب ساچمه‌ها بررسی کردند و نتیجه گرفتند که افزایش سرعت و اندازه ساچمه‌ها منجر به افزایش تغییر شکل پلاستیک قطعه هدف می‌شود. هوامینگ لئو و همکاران [۱۹] تأثیر شات‌پینینگ بر روی صافی سطح را با روش عددی و تجربی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها در تحقیق خود از نرم‌افزار آباکوس برای شبیه‌سازی استفاده کردند و ایده جدیدی را برای محاسبه صافی سطح در فرآیند شات‌پینینگ ارائه دادند. نتایج عددی و تجربی آن‌ها تطابق خوبی با یکدیگر داشتند. هایانگ یان و همکاران [۲۰] میزان پوشش‌دهی سطح در فرآیند شات‌پینینگ را به‌طور تجربی و عددی بررسی کردند. آن‌ها با استفاده از شبیه‌سازی عددی دریافتند که تنش پسماند سطحی و زیرسطحی با افزایش میزان پوشش‌دهی افزایش می‌یابد. نتایج تجربی و عددی آن‌ها با خطای کمتر از ۲۵ درصد با یکدیگر تطابق داشتند.

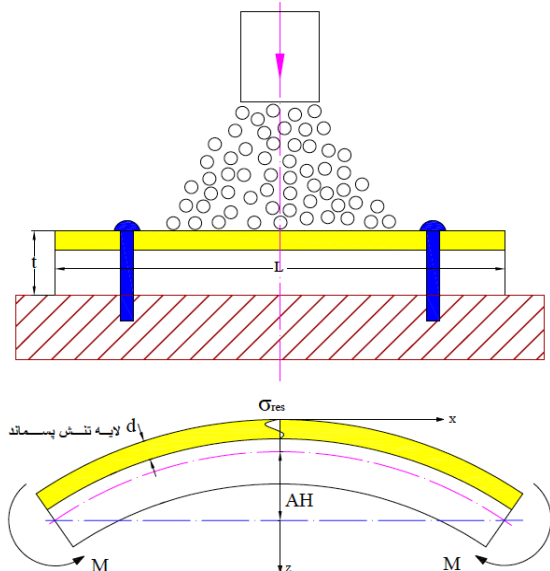
حمزه‌موسی و همکاران [۲۱] اثر پارامترهای شات‌پینینگ بر روی خرابی‌های سطح قطعه را با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود ANSYS شبیه‌سازی نمودند. آن‌ها اثرات تغییر سرعت و تغییر زاویه پرتاب ساچمه‌ها را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که پرتاب مایل ساچمه‌ها موجب تنش پسماند بهتر در زیر سطح و صافی بهتر در روی سطح می‌شود، با این حال، پاشش ساچمه‌ها در زوایای کمتر از ۴۵ درجه می‌تواند باعث کنده شدن مواد از سطح قطعه و در نتیجه ایجاد سطح ناهموار با تنش پسماند کمتر شود. بررسی تحقیقات فوق نشان می‌دهد که به‌جز مدل ارائه شده توسط میائو و همکارانش، سایر مدل‌های موجود نه تنها جنبه‌های تصادفی فرایند شات‌پینینگ را در نظر نمی‌گیرند؛ بلکه از نظر تعداد ساچمه‌ها نیز محدودیت

دسلایف و همکاران [۱۰] با استفاده از روش اجزای محدود تأثیر جنس ساچمه‌ها و قطعه هدف بر روی پروفیل تنش پسماند را مورد مطالعه قرار دادند. مجذوبی و همکاران [۱۱] یک مدل اجزای محدود سه بعدی برای شبیه‌سازی فرآیند شات‌پینینگ ارائه نمودند که می‌توانست تا ۲۵ ساچمه را مدل نماید. آن‌ها توانستند توزیع تنش پسماند را در قطعه هدف به دست آورند. مدل آن‌ها مکان اولیه پرتاب ساچمه‌ها را از قبل مشخص می‌کرد و قادر به شبیه‌سازی حرکت تصادفی ساچمه‌ها نبود. ادوارد و همکاران [۱۲] مدل‌سازی فرآیند شات‌پینینگ جهت ارزیابی تنش‌های پسماند فشاری را انجام دادند. آن‌ها روش ترکیبی FEM-DEM را که قبلاً مورد استفاده قرار گرفته بود را با یک آنالیز ساده استاتیکی جایگزین کردند که موجب کاهش زمان شبیه‌سازی در مقایسه با تکنیک‌های قبل از خود شد.

هونگ و همکاران [۱۳] یک مدل اجزای محدود سه بعدی از برخورد تک ساچمه به سطح یک قطعه فلزی را جهت بررسی توزیع تنش پسماند ارائه دادند. آن‌ها در تحقیق خود اثرات تغییر قطر، سرعت و زاویه برخورد ساچمه‌ها و همچنین اثرات کرنش سختی و تغییر خواص قطعه هدف را بر روی توزیع تنش پسماند مورد بررسی قرار دادند.

میائو و همکاران [۱۴] با کد نویسی در برنامه متلب و ترکیب آن با نرم‌افزار ANSYS توانستند به یک مدل اجزای محدود تصادفی برای شبیه‌سازی فرآیند شات‌پینینگ دست یابند. آن‌ها توانستند با استفاده از مدل خود توزیع تنش پسماند را محاسبه نمایند ولی مدل ارائه شده توسط آن‌ها خیلی پیچیده بود و نیاز به ترکیب دو برنامه متلب و انسیس داشت. میائو و همکاران [۱۵] در تحقیقی دیگر تأثیر سرعت و زمان پاشش ساچمه‌ها بر روی پروفیل تنش پسماند آلیاژ آلومینیوم 2024-T3 را به‌صورت تجربی مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها توانستند پروفیل تنش پسماند را به دست آورند. آن‌ها همچنین در تحقیقی دیگر [۱۶] شکل‌دهی ورق‌های آلومینیومی توسط شات‌پینینگ که قبلاً به روش تجربی مطالعه می‌شد را با نرم‌افزار ANSYS شبیه‌سازی کردند. مدل آن‌ها برای ایجاد رابطه بین ممان پیش خمشی و ارتفاع قوس حاصل از تنش پسماند در تست آلمن استفاده شد. لیچون زی و همکاران [۱۷] توزیع تنش پسماند

برداشتن قیود تکیه‌گاهی، قطعه مطابق با شکل ۲ خم می‌شود [۱۰].



شکل (۲): شکل قطعه قبل و بعد از فرایند شات‌پینینگ.

با استفاده از اصل برهم‌نهی و با فرض اینکه قطعه تحت تأثیر نیرو و ممانی است که از معادلات (۱) و (۲) به دست می‌آیند، می‌توان تنش پسماند که حاصل جمع تنش‌های ایجاد شده در قطعه بعد از تغییر شکل آن است را با استفاده از معادله (۳) محاسبه نمود.

$$\sigma_x^{res} = \sigma_x^{ind} + \frac{F_x}{A} + \frac{M_x(\frac{t}{2} - z)}{I} \quad (3)$$

که در رابطه (۳)،  $\sigma_x^{res}$  تنش پسماند می‌باشد.

### ۳- شبیه‌سازی

مدل اجزای محدود ارائه شده شامل تعداد زیادی از ساچمه‌های یکسان است که به یک هدف آلومینیومی برخورد می‌کنند. به منظور شبیه‌سازی توزیع تصادفی حرکت ساچمه‌ها، برنامه‌ای با استفاده از زبان برنامه‌نویسی پایتون برای اجرا در نرم‌افزار آباکوس تهیه شد. این برنامه برای ایجاد مختصات مرکز هرکدام از ساچمه‌ها به صورت تصادفی مورد استفاده قرار گرفت. همچنین این برنامه طوری طراحی گردیده که در ابتدا تعداد، اندازه، سرعت و زاویه پرتاب ساچمه‌ها را از اپراتور می‌پرسد و سپس با استفاده از مقادیر داده شده به آن برای ابعاد، جنس و شرایط مرزی قطعه

داشتند. همچنین مدل ارائه شده توسط میانو و همکارانش نیاز به کدنویسی در برنامه متلب و ترکیب آن با نرم‌افزار ANSYS داشت که خیلی پیچیده بود؛ بنابراین هدف این تحقیق ارائه یک مدل اجزای محدود سه‌بعدی است که در عین سادگی بتواند حرکت تصادفی پرتاب ساچمه‌ها را شبیه‌سازی نماید و به وسیله آن تأثیر پارامترهای اساسی شات‌پینینگ مانند قطر، سرعت و زاویه برخورد ساچمه‌ها بر تنش پسماند مورد بررسی قرار گرفته تا مقادیر بهینه آن‌ها به دست آید. همچنین روش اندازه‌گیری پارامتر مهم «شدت شات‌پینینگ» تاکنون عمدتاً از طریق تجربی و توسط گیج آلمن انجام شده است که در تحقیق حاضر این پارامتر از طریق روش اجزای محدود اندازه‌گیری می‌گردد. این مدل همچنین محدودیتی از نظر تعداد ساچمه‌ها ندارد و موجب شبیه‌سازی واقعی‌تر از آنچه تاکنون انجام شده است خواهد شد.

### ۲- اصول تئوری

در طی فرایند برخورد ساچمه‌ها با سطح قطعه به واسطه تغییر شکل پلاستیک به وجود آمده در سطح آن یک تنش القاشده در راستای محور طولی قطعه ایجاد می‌گردد که موجب خم شدن آن می‌گردد؛ بنابراین باید یک نیروی فشاری و یک ممان خمشی از طرف قیود تکیه‌گاهی به قطعه اعمال گردد تا در حین عملیات شات‌پینینگ مانع از انبساط سطح و خمش محور آن شوند و حالت تعادل برقرار شود. معادلات (۱) و (۲)، معادلات تعادل نیرو و ممان در این حالت هستند.

$$\int_0^t \sigma_x^{ind} b dz + F_x = 0 \quad (1)$$

$$\int_0^t \sigma_x^{ind} (\frac{t}{2} - z) b dz + M_x = 0 \quad (2)$$

در روابط فوق  $F_x$  و  $M_x$  به ترتیب نیروی فشاری و ممان خمشی ناشی از قیود تکیه‌گاهی و  $\sigma_x^{ind}$  تنش القاشده ناشی از عملیات شات‌پینینگ می‌باشد. همچنین  $b$  عرض و  $t$  ضخامت قطعه می‌باشند. البته با توجه به باز بودن دوسر قطعه و در نتیجه قابل انبساط بودن آن از نظر طولی، نیروی فشاری  $F_x$  ناچیز و قابل صرف نظر کردن می‌باشد. پس از

که در آن  $\epsilon_p$  کرنش پلاستیک معادل،  $\epsilon_0$  و  $\dot{\epsilon}_p$  به ترتیب نرخ تغییر شکل اعمال شده و نرخ تغییر شکل مرجع می‌باشند. همچنین  $T$  دمای کاری و  $T_0$  دمای محیط و  $T_{melt}$  دمای ذوب می‌باشند.  $A$  تنش تسلیم و  $B$  و  $n$  به ترتیب ضریب سخت‌شوندگی و نمای آن می‌باشند.  $C$  و  $m$  نیز ثابت‌هایی هستند که به ترتیب بیانگر حساسیت جریان تنش نسبت به نرخ کرنش و دما می‌باشند. از آنجائی که شات‌پینینگ یک فرآیند کار سرد است و در طی این فرآیند افزایش دمای قطعه ناچیز می‌باشد، لذا ارتباط جریان تنش با دما ناچیز و قابل صرف‌نظر کردن می‌باشد. مقادیر پارامترهای رابطه جانسون- کوک برای آلیاژ آلومینیوم 2024-T3 در جدول ۱ داده شده است [۲۲].

مطابق با برنامه نوشته‌شده، ساچمه‌ها در موقعیت‌های تصادفی ایجاد و مش زده شدند. تمامی مراحل مدل‌سازی ساچمه‌ها و قطعه هدف توسط برنامه ارائه‌شده انجام می‌شود و کاربر نیازی به طی مراحل معمول برای مدل‌سازی در نرم‌افزار آباکوس را ندارد. کاربر فقط تعداد، اندازه، سرعت و زاویه پرتاب ساچمه‌ها را در ابتدای فرایند مدل‌سازی برای برنامه تعریف می‌نماید و ادامه روند مدل‌سازی توسط برنامه انجام می‌گردد. نتایج شبیه‌سازی برخورد ساچمه‌ها با قطعه هدف در شکل ۲ قابل‌مشاهده است. به‌منظور محاسبه دقیق پروفیل تنش پس‌ماند در محدوده برخورد ساچمه‌ها، ۳۶ مسیر در راستای ضخامت قطعه تعریف شد و در راستای هر مسیر مقادیر تنش پسماند به دست آمد. سپس با درون‌یابی از مقادیر به‌دست‌آمده در این مسیرها، مقدار تنش پسماند میانگین در طول ضخامت قطعه محاسبه شد.

**جدول (۱):** پارامترهای رابطه جانسون - کوک برای آلومینیوم 2024-T3.

پارامتر	واحد	مقدار
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	۲۲۷۰
$E$	GPa	۷۳/۰۸۴
$\nu$	-	۰.۲/۳۳
$A$	MPa	۳۶۹
$B$	MPa	۶۸۴
$C$	-	۰/۰۰۸۳
$n$	-	۰/۷۳

هدف، به‌وسیله دستورات تعریف‌شده در آن مطابق با ماژول‌های برنامه آباکوس شروع به مدل‌سازی فرایند دینامیکی برخورد ساچمه‌ها با قطعه هدف می‌نماید. در هنگام مدل‌سازی ساچمه‌ها، موقعیت مکانی هرکدام از آن‌ها در فضای تعریف‌شده به‌صورت تصادفی با استفاده از تابع رندوم مطابق با روابط (۴) تا (۶) تعریف می‌گردد. بعد از مدل‌سازی مسئله، کاربر با استفاده از ماژول job در برنامه آباکوس، شروع به حل مسئله و گرفتن نتایج می‌نماید.

تمام ساچمه‌ها از جنس فولاد با مدول الاستیسیته ۲۱۰ GPa و چگالی ۷۸۰۰ kg/m<sup>3</sup> بودند که تأثیر اندازه، سرعت و زاویه پرتاب آن‌ها بر روی تنش پس‌ماند در قطعه هدف موردبررسی قرار گرفت. همچنین ورق‌ها از جنس آلومینیوم 2024-T3 با ابعاد ۳ mm × ۱۹ mm × ۷۶ mm مطابق با ابعاد استاندارد ورق آلومین به‌عنوان قطعه هدف مورد استفاده قرار گرفت که در مرکز آن ناحیه‌ای به ابعاد ۶ mm × ۶ mm × ۳ mm<sup>3</sup> با المان‌های کوچکی به ابعاد ۰/۲ mm × ۰/۲ mm × ۰/۲ mm<sup>3</sup> مش‌بندی شد که محل برخورد ساچمه‌ها می‌باشد. لازم به ذکر است که محدودیتی از طرف برنامه ارائه‌شده برای تعریف تعداد ساچمه‌ها وجود ندارد؛ بلکه تنها محدودیت موجود، سرعت پردازنده کامپیوتر برای عملیات شبیه‌سازی است که برای تعداد زیاد ساچمه‌ها با توجه به دینامیکی بودن مسئله، موجب طولانی‌شدن زمان عملیات مدل‌سازی و پردازش می‌گردد.

$$X = -0,002 + 0,004 * \text{random}(0,1) \quad (۴)$$

$$Y = -0,002 + 0,004 * \text{random}(0,1) \quad (۵)$$

$$Z = 0,01 + 0,1 * \text{random}(0,1) \quad (۶)$$

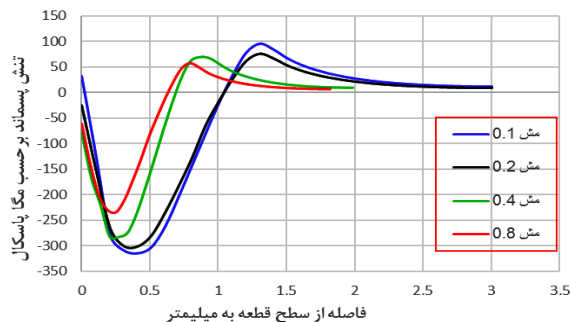
که در روابط فوق  $\text{random}(0,1)$  تابع رندوم در بازه (۰,۱) است. همچنین محور  $Z$  در امتداد ضخامت قطعه است. با توجه به‌سختی بیشتر فولاد نسبت به آلومینیوم، در این تحقیق فرض شده که ساچمه‌ها صلب هستند و ورق آلومینیوم مورد استفاده از مدل ماده جانسون - کوک مطابق با رابطه (۷) پیروی می‌نماید.

$$\sigma_y = [A + B\epsilon_p^n] \left[ 1 + C \ln \frac{\dot{\epsilon}_p}{\dot{\epsilon}_0} \right] \left[ 1 - \left( \frac{T - T_0}{T_{melt} - T_0} \right)^m \right] \quad (۸)$$

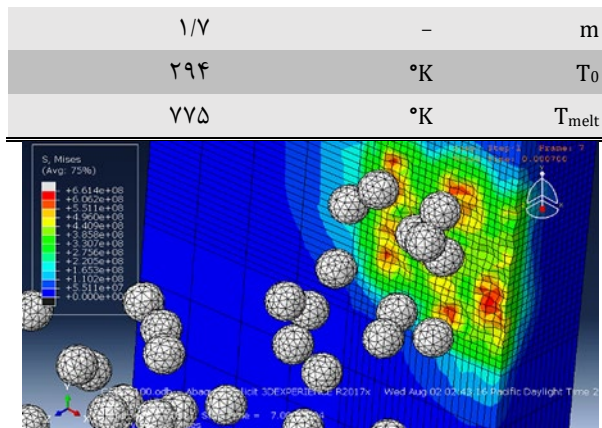
ارائه شده است. اختلاف جزئی بین نتایج تجربی و شبیه سازی عددی را می توان به اختلاف در جنس ساچمه های مورد استفاده و خطاهایی نسبت داد که ممکن است از ساده سازی ها در مدل سازی عددی و خطاهای کار تجربی ناشی شده باشد. ولی به طور کلی روند تغییرات دو نمودار یکسان است.

#### ۵- بررسی حساسیت مدل نسبت به اندازه مش

برای اعتبار داشتن جواب های یک مسئله اجزای محدود، باید همگرایی در جواب ها رخ داده باشد، یعنی هرچه المان ها ریزتر شوند، تغییری در جواب ها مشاهده نگردد و یا تغییر مشاهده شده ناچیز باشد. به همین منظور مدل اجزای محدود حاضر برای چهار سایز المان  $0.1$ ،  $0.2$ ،  $0.4$  و  $0.8$  میلی متر معکب حل شد که در این حالت تعداد المان ها در قطعه هدف به ترتیب برابر با  $1024$ ،  $4232$ ،  $21660$  و  $138720$  عدد گردید. یعنی در هر مرحله اندازه المان ها نسبت به حالت قبل نصف و در نتیجه تعداد آن ها بیشتر شد. سپس تأثیر این کار بر مقدار توزیع تنش پسماند بررسی شد که نتیجه آن در شکل ۵ نشان داده شده است. همان طوری که در این شکل ملاحظه می شود جواب ها در المان با اندازه  $0.2 \text{ mm}^3$  همگرا شده اند؛ یعنی از این نقطه به بعد تغییر رخ داده در جواب ها ناچیز می باشد. البته لازم به ذکر است که زمان لازم برای حل مسئله توسط نرم افزار وقتی سایز المان ها از  $0.2$  به  $0.1$  تغییر کرد، حدود ۷ برابر شد؛ لذا انتخاب المان با اندازه  $0.2 \text{ mm}^3$  برای حل این مسئله منطقی است. حال که از اعتبار مدل حاضر اطمینان حاصل شد در ادامه توسط آن، اثرات تغییر پارامترهای شات پینینگ بر توزیع تنش پسماند مورد بررسی قرار خواهد گرفت.



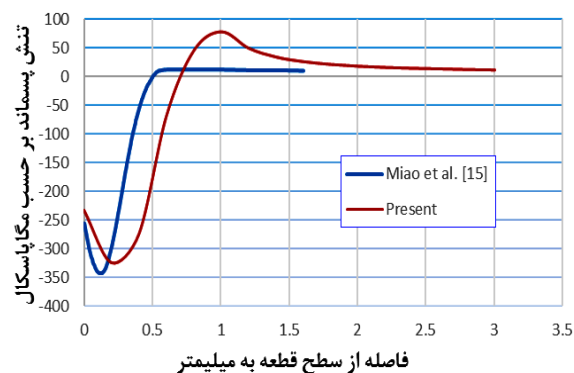
شکل (۵): بررسی حساسیت مدل نسبت به اندازه مش.



شکل (۳): شبیه سازی برخورد ساچمه ها با قطعه در آباکوس.

#### ۴- اعتبارسنجی مدل عددی

برای اعتبارسنجی مدل پیشنهادی و مقایسه نتایج به دست آمده از آن با نتایج تجربی، پروفیل تنش پسماند به دست آمده از این مدل با داده های تجربی به دست آمده از تحقیق انجام شده توسط میائو و همکاران [۱۵] مقایسه شد. در این مقاله، مشخصات قطعه هدف و اندازه ساچمه های مورد استفاده همانند مواردی بود که توسط میائو و همکاران انتخاب شده بود. البته جنس ساچمه های مورد استفاده توسط آن ها سرامیکی بود. شکل ۴ مقایسه تغییرات تنش پسماند در امتداد ضخامت قطعه حاصل از روش مدل سازی حاضر و کار تجربی انجام شده توسط میائو و همکاران را نشان می دهد.



شکل (۴): اعتبارسنجی مدل عددی.

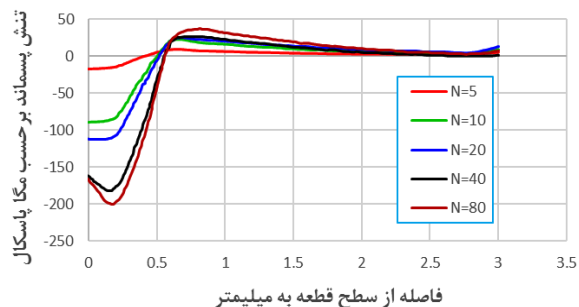
تطابق خوبی بین نتایج شبیه سازی حاضر و نتایج کار تجربی میائو و همکاران مشاهده می شود که نشان از دقت مدل

متوسط در این لایه را با  $\bar{\sigma}$  نمایش دهیم آنگاه می‌توان رابطه ۲ را به صورت ساده شده (۱۰) نوشت. با جاگذاری رابطه (۱۰) در رابطه (۹) ارتفاع قوس نوار آلمن یا همان شدت شات‌پینینگ به صورت رابطه (۱۱) به دست خواهد آمد.

$$M_x = \bar{\sigma}bd(t-d)/2 \quad (10)$$

$$AH = \frac{3\bar{\sigma}d(t-d)L^2}{4Et^3} \quad (11)$$

با استفاده از رابطه (۱۱) و داشتن تنش متوسط فشاری که از شبیه‌سازی به دست می‌آید می‌توان شدت شات‌پینینگ را محاسبه نمود. برای پنج گروه از ساچمه‌های به تعداد ۵، ۱۰، ۲۰، ۴۰ و ۸۰ عدد شبیه‌سازی انجام شد. تعداد ساچمه‌ها در هر مرحله نسبت به مرحله قبل دو برابر انتخاب شد تا نقطه اشباع شات‌پینینگ طبق تعریف آن به دست آید. چون دو برابر کردن تعداد ساچمه‌ها در هر مرحله معادل با دو برابر کردن زمان پاشش ساچمه‌ها است. در هر مرحله از شبیه‌سازی مقدار تنش پسماند در ناحیه برخورد ساچمه‌ها که سطحی به ابعاد  $6 \times 6 \text{ mm}^2$  است، در ۳۶ مسیر مختلف در امتداد ضخامت قطعه به دست آمد و سپس با درون‌یابی از این ۳۶ مسیر مختلف، مقدار تنش متوسط فشاری در طول ضخامت قطعه محاسبه شد. نتیجه این کار به طور خلاصه در شکل ۶ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌گردد ضخامت (d) لایه‌ای که در آن تنش پسماند فشاری وجود دارد حدود  $0.6$  میلی‌متر است. حال با معدل گرفتن از مقدار تنش پسماند در طول این لایه برای هر نمودار می‌توان مقدار تنش متوسط پسماند ( $\bar{\sigma}$ ) را برای آن محاسبه نمود. درنهایت با جایگذاری این مقدار در رابطه ۱۱ اندازه ارتفاع قوس یا شدت شات‌پینینگ به دست می‌آید.



حال که از اعتبار مدل حاضر اطمینان حاصل شد در ادامه توسط آن، اثرات تغییر پارامترهای شات‌پینینگ بر توزیع تنش پسماند مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

## ۶- بررسی پارامترهای فرایند شات‌پینینگ

### ۶-۱- بررسی شدت شات‌پینینگ و منحنی اشباع

شدت شات‌پینینگ یک پارامتر کنترلی مهم برای این فرایند است که به مقدار انرژی جنبشی منتقل شده از طرف جریان ساچمه‌ها به قطعه کار مربوط می‌شود. روشی که به طور گسترده برای اندازه‌گیری شدت شات‌پینینگ مورد استفاده قرار می‌گیرد توسط آقای آلمن معرفی شده و شدت آلمن نامیده می‌شود.

این روش شامل شات کردن یک نوار فلزی استاندارد با ابعاد و جنس معین به نام نوار آلمن است که با استفاده از چهار پیچ به یک فیکسچر متصل می‌گردد. پس از عملیات شات‌پینینگ و هنگامی که پیچ‌ها برداشته می‌شوند، نوار به سمت بالا انحنای می‌یابد. (شکل ۲) ارتفاع قوس به دست آمده که معرف شدت شات‌پینینگ است را می‌توان برای زمان‌های مختلف پاشش ساچمه‌ها اندازه‌گیری نمود. در این حالت نقطه اشباع شات‌پینینگ به عنوان نقطه‌ای در منحنی «زمان-ارتفاع قوس» تعریف می‌شود که در آن نقطه با دو برابر کردن زمان پاشش ساچمه‌ها افزایش ارتفاع قوس کمتر از ۱۰ درصد باشد. همان‌طور که در شکل ۲ ملاحظه می‌گردد ارتفاع قوس نوار آلمن (AH) بیانگر مقدار خیز در وسط تیر یا نوار است که از روابط مقاومت مصالح برای خیز تیر با تکیه‌گاه ساده که تحت گشتاور خمشی M در دو سر خود قرار دارد، داریم:

$$y = \frac{M_x L^2}{8EI} = AH \quad (8)$$

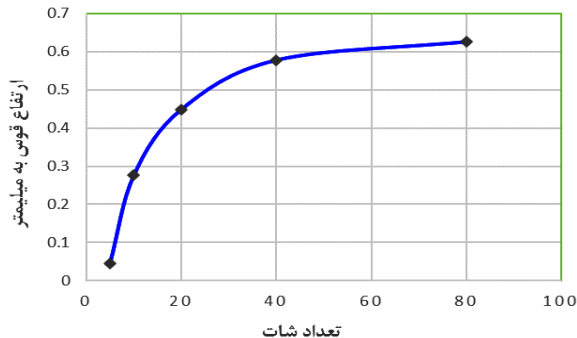
با جاگذاری مقدار ممان اینرسی I برای این تیر خواهیم داشت:

$$y = \frac{3M_x L^2}{2Ebt^3} = AH \quad (9)$$

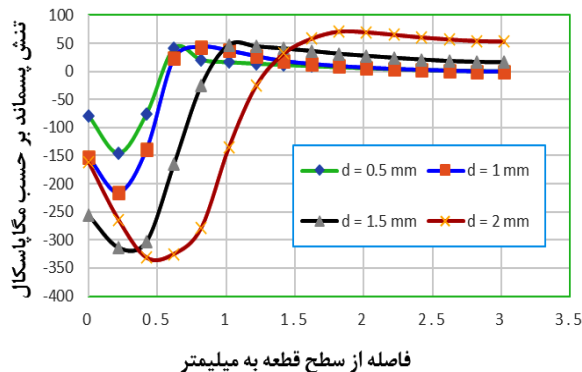
که در آن L، b و t به ترتیب طول، عرض و ضخامت تیر یا همان نوار آلمن هستند. اگر ضخامت لایه‌ای که تحت تنش فشاری است را با d نمایش دهیم (شکل ۲) و تنش فشاری



قطر ساچمه‌ها تأثیر فراوانی در افزایش تنش پسماند ندارند؛ لذا می‌توان نتیجه گرفت که مقدار بهینه برای اندازه قطر ساچمه‌ها، ۱/۵ میلی‌متر است. البته در عمل هم استفاده از قطرهای بیشتر از ۲ میلی‌متر در فرایند شات‌پینینگ معمول نیست؛ زیرا استفاده از قطرهای بزرگ موجب ناهموار شدن سطح قطعه می‌گردد که خود می‌تواند عامل ایجاد مراکز تمرکز تنش و جوانه‌زنی و رشد ترک گردد و مزیت استفاده از فرایند شات‌پینینگ را از بین ببرد. همچنین علت به وجود آمدن تنش پسماند فشاری ناشی از برخورد ساچمه‌ها با سطح قطعه را نیز می‌توان به کمک شکل ۱ توضیح داد. همان‌طوری که در شکل ۱ ملاحظه می‌گردد، ماده‌ای از قطعه که زیر سطح تغییرشکل یافته قرار دارد سعی می‌کند سطح قطعه را به شکل اولیه خود برگرداند، در نتیجه به‌واسطه همپوشانی تغییرشکل‌های ایجادشده ناشی از برخورد سایر ساچمه‌ها، یک‌لایه یکنواخت فشاری در زیر سطح قطعه ایجاد می‌گردد. با پیشروی در امتداد عمق قطعه تغییرشکل پلاستیک کمتر و در نتیجه تنش پسماند ناشی از آن هم کمتر می‌شود.



شکل (۷): منحنی اشباع برای نوار آلیاژ آلومینیوم 2024-T3.



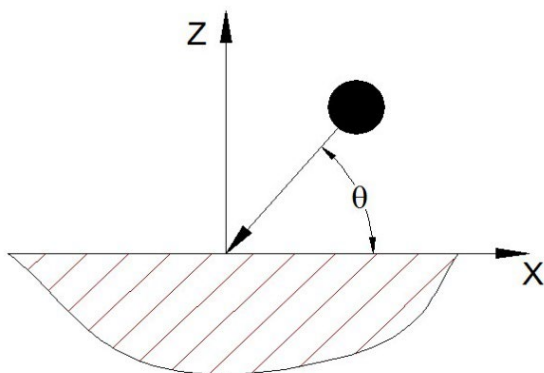
شکل (۶): پروفیل تنش پسماند برای تعداد ساچمه‌های مختلف.

اکنون می‌توان نمودار شدت شات‌پینینگ را برای تعداد ساچمه‌های مختلف رسم نمود که در شکل ۷ این کار انجام شده است. این نمودار منحنی اشباع نیز نامیده می‌شود. توسط این نمودار می‌توان نقطه اشباع یعنی نقطه‌ای که در آن با دو برابر کردن تعداد ساچمه‌ها ارتفاع کمان کمتر از ۱۰ درصد افزایش می‌یابد را به دست آورد. مطابق با شکل ۶ در فاصله بین ۴۰ تا ۸۰ عدد ساچمه، یعنی با دو برابر کردن تعداد ساچمه مقدار افزایش ارتفاع قوس کمی بیش از ۸ درصد و کمتر از ۱۰ درصد است؛ یعنی در ۴۰ عدد ساچمه، قطعه به مرز اشباع می‌رسد که در این حالت شدت شات‌پینینگ نیز مطابق با نمودار ۰/۵۷۷ میلی‌متر است؛ بنابراین تعداد بهینه برای پرتاب ساچمه‌ها ۴۰ عدد است؛ لذا در ادامه تحقیق حاضر و برای بررسی اثر سایر پارامترها بر پروفیل تنش پسماند، تعداد ساچمه‌های پرتاب شده برای بررسی تأثیر هر پارامتر، با کمی محافظه‌کاری ۵۰ عدد در نظر گرفته شد. همچنین برای بررسی تأثیر تغییرات هر پارامتر، سایر پارامترها ثابت در نظر گرفته شد.

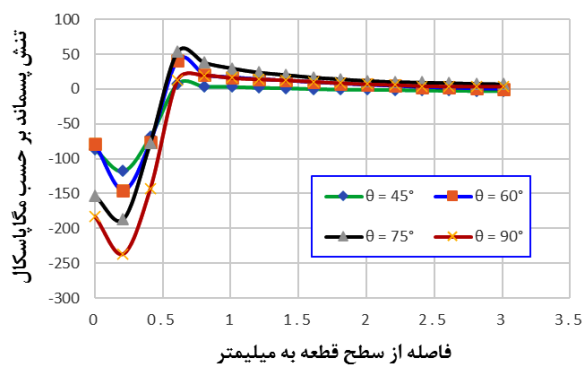
## ۲-۶- بررسی تأثیر قطر ساچمه‌ها بر تنش پسماند

برای بررسی تأثیر اندازه قطر ساچمه‌ها بر پروفیل تنش پسماند از چهار قطر مختلف ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ میلی‌متر استفاده شد. برای هر حالت سرعت پرتاب ساچمه‌ها ۵۰ متر بر ثانیه و زاویه پرتاب آن‌ها نیز ۹۰ درجه در نظر گرفته شد. شکل ۸ پروفیل تنش پسماند به‌دست‌آمده برای قطرهای مختلف ساچمه‌ها را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۸ ملاحظه می‌گردد افزایش قطر ساچمه‌ها باعث افزایش قابل‌ملاحظه‌ای در مقدار و عمق تنش پسماند می‌گردد. افزایش تنش پسماند در اثر افزایش اندازه ساچمه‌ها را می‌توان به افزایش انرژی منتقل‌شده توسط آن‌ها به قطعه و در نتیجه افزایش تغییرشکل پلاستیک سطح قطعه و کار سختی ناشی از آن نسبت داد. البته این افزایش از قطر ۱/۵ میلی‌متر به بعد ناچیز است. در واقع تا قطر ۱/۵ میلی‌متر سطح قطعه از تنش پسماند اشباع می‌گردد و افزایش بیشتر

برای بررسی تأثیر زاویه پرتاب ساچمه‌ها بر پروفیل تنش پسماند از چهار زاویه مختلف ۴۵، ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درجه مطابق با شکل ۱۰ استفاده شد. سرعت پرتاب ساچمه‌ها ۵۰ متر بر ثانیه و قطر آن‌ها نیز ۱ میلی‌متر در نظر گرفته شد. شکل ۱۱ پروفیل تنش پسماند به‌دست‌آمده را برای زوایای مختلف پرتاب ساچمه‌ها نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۱۱ ملاحظه می‌گردد تأثیر تغییر زاویه پرتاب ساچمه‌ها نسبت به تغییر قطر و سرعت پرتاب ساچمه‌ها از همه کمتر است. همچنین ملاحظه می‌گردد که بهترین زاویه برای پرتاب ساچمه‌ها ۹۰ درجه است چون که در این حالت بیشترین افزایش در مقدار تنش پسماند به دست می‌آید. علت این مسئله را می‌توان به این صورت توضیح داد که در حالت ۹۰ درجه چون برخورد به‌صورت رودررو صورت می‌گیرد، تمام انرژی ساچمه‌ها به قطعه هدف منتقل می‌شود؛ ولی در برخورد با زوایای کمتر از ۹۰ درجه چنین چیزی مشاهده نمی‌گردد.



شکل (۱۰): زاویه برخورد  $\theta$  ساچمه‌ها با سطح قطعه.

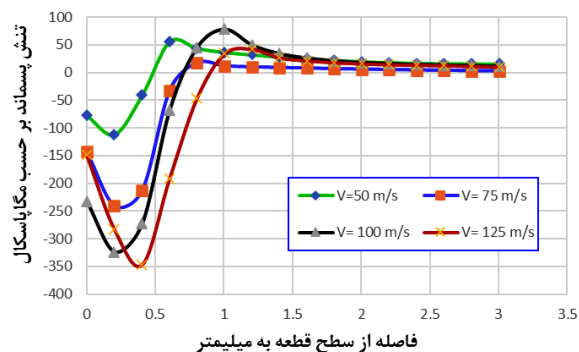


شکل (۱۱): تأثیر تغییر زاویه پرتاب ساچمه‌ها بر پروفیل تنش پسماند.

شکل ۸: تأثیر تغییر قطر ساچمه‌ها بر پروفیل تنش پسماند.

### ۳-۶- بررسی تأثیر سرعت ساچمه‌ها بر تنش پسماند

برای بررسی تأثیر سرعت پرتاب ساچمه‌ها بر پروفیل تنش پسماند از چهار سرعت مختلف ۵۰، ۷۵، ۱۰۰ و ۱۲۵ متر بر ثانیه استفاده شد. قطر ساچمه‌ها ۱ میلی‌متر و زاویه پرتاب آن‌ها نیز ۹۰ درجه در نظر گرفته شد. شکل ۹ پروفیل تنش پسماند به‌دست‌آمده برای سرعت‌های مختلف پرتاب ساچمه‌ها را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۹ ملاحظه می‌گردد افزایش سرعت پرتاب ساچمه‌ها باعث افزایش مقدار و عمق تنش پسماند می‌گردد. این مسئله را نیز می‌توان به افزایش تغییر شکل پلاستیک سطح قطعه و در نتیجه افزایش کار سختی ایجاد شده در آن نسبت داد. البته این افزایش بعد از سرعت ۱۰۰ متر بر ثانیه ناچیز است. در واقع می‌توان نتیجه گرفت که سرعت بهینه برای پرتاب ساچمه‌ها حدود ۱۰۰ متر بر ثانیه است چون که افزایش سرعت بیش از آن تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای در افزایش مقدار تنش پسماند ندارد. در شکل ۹ نیز همانند شکل ۸ مقدار افزایش تنش پسماند بعد از ۳۰۰ مگاپاسکال ناچیز است که می‌تواند بیانگر اشباع شدن سطح قطعه از تنش پسماند در مقدار ۳۰۰ مگاپاسکال باشد.



شکل (۹): تأثیر تغییر سرعت ساچمه‌ها بر پروفیل تنش پسماند.

### ۴-۶- بررسی تأثیر زاویه پرتاب ساچمه‌ها بر تنش پسماند

stress by shot peening. *International Journal of Fatigue*. 1998;20(5):351-7. DOI

[https://doi.org/10.1016/S0142-1123\(98\)00002-4](https://doi.org/10.1016/S0142-1123(98)00002-4).

[7] Meguid S, Shagal G, Stranart J, Daly J. Three-dimensional dynamic finite element analysis of shot-peening induced residual stresses. *Finite elements in analysis and design*. 1999;31(3):179-91. DOI [https://doi.org/10.1016/S0168-874X\(98\)00057-2](https://doi.org/10.1016/S0168-874X(98)00057-2).

[8] Guagliano M. Relating Almen intensity to residual stresses induced by shot peening: a numerical approach. *Journal of Materials Processing Technology*. 2001;110(3):277-86. DOI [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(00\)00893-1](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00893-1).

[9] Schiffrer K. Simulation of residual stresses by shot peening. *Computers & structures*. 1999;72(1-3):329-40. DOI [https://doi.org/10.1016/S0045-7949\(99\)00012-7](https://doi.org/10.1016/S0045-7949(99)00012-7).

[10] Deslaef D, Rouhaud E, Rasouli-Yazdi S, editors. 3D finite element models of shot peening processes. *Materials science forum*; 2000: Trans Tech Publ. DOI <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.347-349.241>.

[11] Majzoubi G, Azizi R, Nia AA. A three-dimensional simulation of shot peening process using multiple shot impacts. *Journal of Materials Processing Technology*. 2005;164:1226-34. DOI <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.02.139>.

[12] Edward AB, Heyns PS, Pietra F. Shot peening modeling and simulation for RCS assessment. *Procedia Manufacturing*. 2017;7:172-7. DOI <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2016.12.044>.

[13] Hong T, Ooi J, Shaw B. A numerical study of the residual stress pattern from single shot impacting on a metallic component. *Advances in Engineering software*. 2008;39(9):743-56. DOI <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2007.10.002>.

[14] Miao H, Larose S, Perron C, Lévesque M. On the potential applications of a 3D random finite element model for the simulation of shot peening. *Advances in engineering software*. 2009;40(10):1023-38. DOI <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2009.03.013>.

[15] Miao H, Demers D, Larose S, Perron C, Lévesque M. Experimental study of shot peening and stress peen forming. *Journal of Materials*

## ۷- نتیجه گیری

در این تحقیق با استفاده از مدل معرفی شده که حرکت تصادفی ساچمه‌ها را در نظر می‌گرفت، اثر تغییر پارامترهای مختلف فرایند شات‌پینینگ بر روی پروفیل تنش پسماند مورد مطالعه قرار گرفت. همچنین مهم‌ترین پارامتر فرایند شات‌پینینگ یعنی «شدت شات‌پینینگ» که معمولاً از طریق تجربی و توسط گیج آلمن اندازه‌گیری می‌شود، به وسیله این مدل اندازه‌گیری شد و توسط آن تعداد بهینه ساچمه‌ها برای رسیدن به نقطه اشباع که ۴۰ عدد بود، به دست آمد. نتایج به دست آمده تطابق خوبی با نتایج تجربی حاصل از کار دیگر محققین داشت و لذا می‌توان از صحت مدل ارائه شده اطمینان حاصل نمود.

از میان پارامترهای اندازه‌گیری شده، افزایش قطر ساچمه‌ها بیشترین و افزایش زاویه پرتاب ساچمه‌ها کمترین تأثیر را در افزایش مقدار و عمق تنش پسماند داشتند. همچنین مقادیر بهینه برای قطر ساچمه‌ها برابر با ۱/۵ میلی‌متر، برای سرعت پرتاب ساچمه‌ها برابر با ۱۰۰ متر بر ثانیه و برای زاویه پرتاب ساچمه‌ها برابر با ۹۰ درجه به دست آمد. به همین ترتیب با استفاده از این مدل شاید بتوان روشی برای اندازه‌گیری میزان پوشش‌دهی سطح ارائه نمود که در حال حاضر بیشتر به صورت چشمی تخمین زده می‌شود و می‌تواند زمینه تحقیقات بیشتر در آینده باشد.

## ۸- مراجع

[1] Al-Hassani S. Mechanical aspects of residual stress development in shot peening. *Shot Peening*. 1981;583.

[2] Al-Hassani S. The shot peening of metals—Mechanics and structures. *SAE transactions*. 1982:4513-25.

[3] MIC. *Shot Peening Applications*. 9th ed: Metal Improvement Company; 2005.

[4] Almen JO, Black PH. *Residual stresses and fatigue in metals*; 1963.

[5] Al-Obaid Y. Shot peening mechanics: experimental and theoretical analysis. *Mechanics of Materials*. 1995;19(2-3):251-60. DOI [https://doi.org/10.1016/0167-6636\(94\)00036-G](https://doi.org/10.1016/0167-6636(94)00036-G).

[6] Kobayashi M, Matsui T, Murakami Y. Mechanism of creation of compressive residual

Processing Technology. 2010;210(15):2089-102.

**DOI**

<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.07.016>.

[16] Miao H, Larose S, Perron C, Lévesque M. Numerical simulation of the stress peen forming process and experimental validation. *Advances in Engineering Software*. 2011;42(11):963-75. **DOI** <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2011.05.025>.

[17] Xie L, Wang C, Wang L, Wang Z, Jiang C, Lu W, Ji V. Numerical analysis and experimental validation on residual stress distribution of titanium matrix composite after shot peening treatment. *Mechanics of Materials*. 2016;99:2-8.

**DOI**

<https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2016.05.005>.

[18] Ullah H, Ullah B, Rauf A, Muhammad R. Dynamic finite element analysis of shot peening process of 2618-T61 aluminium alloy. *Scientia Iranica*. 2019;26(3):1378-87. **DOR**

<https://dorl.net/dor/20.1001.1.10263098.2019.26.3.9.2>.

[19] Liu H, Dong H, Tang J, Ding H, Shao W, Zhao J, Jiang T. Numerical modeling and experimental verification of surface roughness of 12Cr2Ni4A alloy steel generated by shot peening. *Surface and Coatings Technology*. 2021;422:127538. **DOI** <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127538>.

[20] Yuan H, You Z, Zhuo Y, Ye X, Zhu L, Yang W. Numerical and Experimental Study on Reasonable Coverage of Shot Peening on ZGMn13 High Manganese Steel. *Frontiers in Materials*. 2022;9:897718. **DOI**

<https://doi.org/10.3389/fmats.2022.897718>.

[21] Mousa H, Omari MA. Investigating the effect of shot peening parameters on the peened surface damage using FEA. *Results in Engineering*. 2023:101355. **DOI**

<https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101355>.

[22] Mohamed GF, Soutis C, Hodzic A. Blast resistance and damage modelling of fibre metal laminates to blast loads. *Applied Composite Materials*. 2012;19:619-36. **DOI**

<https://doi.org/10.1007/s10443-011-9225-8>.