

## بررسی عددی و تجربی تنش پسماند و استحکام خستگی فولاد CK35 در فرآیند ساچمه زنی

مهدی تاجداری<sup>۱</sup>، حمیدرضا بهاروندی<sup>۲</sup>، علیرضا مرادخانی<sup>۳\*</sup>

\* نویسنده مسئول: tajdari@iuim.ac.ir

### واژه‌های کلیدی

ساچمه زنی، تست خستگی، تنش پسماند، فولاد

### چکیده

ساچمه زنی نوعی بمباران سطحی قطعه کار توسط هزاران ساچمه است که به ایجاد تنش پسماند فشاری در سطح قطعه کار می‌انجامد و به منظور بهبود خواص مکانیکی همچون خستگی، مقاومت در برابر خوردگی تنش، صاف کردن شکل دهی و... انجام می‌گیرد. در این پژوهش نمونه‌هایی از فولاد CK35 مورد عملیات ساچمه زنی با سرعت برخورد  $100 \text{ m/s}$  و  $200 \text{ m/s}$  ساچمه‌های استاندارد S230 قرار گرفتند و استحکام خستگی آن‌ها با نمونه‌های فاقد ساچمه زنی مورد مقایسه قرار گرفت. همچنین تغییر عمق نفوذ ساچمه‌ها در نمونه‌ها توسط نرم افزار ANSYS محاسبه گردید و با نتایج تجربی مقایسه شد. نتایج حاصل، افزایش قابل توجه استحکام خستگی را در برداشت. این مقادیر برای برخورد ساچمه‌ها با سرعت  $100 \text{ m/s}$ ،  $25\%$  افزایش در استحکام خستگی و بیش از  $250 \text{ MPa}$  تنش پسماند ایجاد شده در سطح کار و برای برخورد ساچمه‌ها با سرعت  $200 \text{ m/s}$ ،  $40\%$  افزایش در استحکام خستگی و بیش از  $300 \text{ MPa}$  تنش پسماند در سطح کار به دست آمد. همچنین میزان تنش ایجاد شده در ساچمه‌ها دو برابر تنش پسماند القاء شده نسبت به سطح کار حاصل شد.

۱- استاد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات مرکزی، گروه مکانیک، اراک، ایران

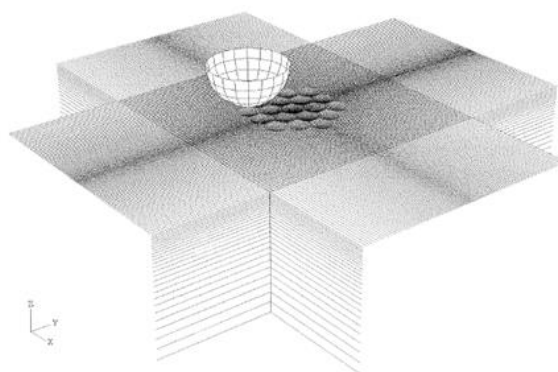
۲- دانشیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، گروه مواد، تهران، ایران

۳- کارشناس ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شرق، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی مکانیک

## ۱- مقدمه

به‌طور کلی برای ایجاد تنش‌های پسماند فشاری از روش‌های مختلف مکانیکی و ترموشیمیایی می‌توان استفاده کرد. ساچمه‌زنی و نورد موضعی سطح از جمله روش‌های مکانیکی قابل استفاده برای ایجاد تنش‌های پسماند می‌باشند. درحالی‌که از انواع عملیات حرارتی سطحی مانند نیتروژن‌دهی سطحی و ... می‌توان به عنوان نمونه‌هایی از روش‌های ترموشیمیایی یاد کرد.

ساچمه‌زنی در واقع نوعی فرآیند کار سرد است که در آن برخورد مواد مختلف همچون فلزات آهنی (چدن و فولاد)، سرامیک یا شیشه [۱] توسط ذره‌های ریز کروی به سطح فلزات، موجب ایجاد تنش پسماند فشاری در سطح قطعه می‌گردد. کار سرد ناشی از ساچمه‌زنی باعث اعمال تنش به سطح نمونه‌ها شده و سطح با دریافت این تنش دچار کار سختی شده و تنش پسماند فشاری در آن ذخیره می‌شود. این فرآیند برای مدت‌ها به عنوان یکی از بهترین فرآیندهای ایجاد تنش‌های پسماند فشاری شناخته می‌شده است [۲]. شکل ۱ بیانگر تصویر شماتیک فرآیند ساچمه‌زنی است.



شکل (۱) شماتیک کلی فرآیند ساچمه‌زنی [۳].

معیار اثر بخشی فرآیند ساچمه‌زنی متغیری است که شدت ساچمه‌زنی نامیده می‌شود. شدت ساچمه‌زنی به عواملی مانند انرژی جنبشی، زمان پاشش جریان ساچمه‌ها، زاویه برخورد ساچمه‌ها، جنس و اندازه آنها بستگی دارد.

عموماً ساچمه‌زنی به منظور بالا بردن برخی خواص مکانیکی همچون افزایش عمر خستگی و مقاومت در برابر ضربه و خوردگی تنش‌ی بر روی قطعه‌های مختلف انجام می‌گیرد. نتایج تحقیق‌های پیشین [۷-۴] نشان دهنده این است که تنش پسماند فشاری در قطعاتی که تحت تاثیر تنش‌های کششی متناوب قرار دارند، باعث افزایش فوق العاده عمر خستگی آن‌ها می‌شود. بهبود در رفتار خستگی قطعه‌ها بعد از انجام ساچمه‌زنی ناشی از دو عامل اصلی است: (۱) تغییر شکل پلاستیک و کار سختی لایه‌های سطحی در اثر پذیری از انرژی جنبشی جریان ساچمه‌ها که باعث بالا رفتن تنش تسلیم می‌شود و (۲) ایجاد تنش پسماند فشاری در لایه‌های سطحی که در اثر ساچمه‌زنی حاصل می‌گردد [۱].

تحقیقات مختلفی در مورد اثرهای ساچمه‌زنی بر روی رفتار خستگی و رشد ترک خستگی انجام شده است. به‌طور کلی می‌توان اظهار داشت که نسبت زمان ایجاد ترک به زمان انتشار ترک‌های خستگی در نمونه‌های ساچمه‌زنی شده نسبت به نمونه‌های ساده بیشتر است. ساچمه‌زنی به‌طور موثر بر روی رشد ترک در محدوده ترک‌های کوتاه تاثیر می‌گذارد؛ زیرا رشد ترک در این منطقه شدیداً به ویژگی‌های ریزساختاری وابسته است. نرخ رشد ترک‌های کوتاه در نمونه‌های ساچمه‌زنی شده بسیار کمتر است؛ زیرا علاوه بر اثر تنش پسماند اولیه مقاومت در مقابل تغییر شکل پلاستیک نوک ترک به دلیل کار سختی بسیار بالا است. هرچه شدت ساچمه‌زنی افزایش یابد، تأثیر بیشتری در رفتار خستگی مشاهده می‌شود. به‌طور کلی می‌توان اظهار داشت که ساچمه‌زنی، هم بر روی زمان ایجاد ترک تاثیر گذاشته و زمان ایجاد ترک را افزایش می‌دهد و هم عمر کلی خستگی را افزایش می‌دهد [۵].

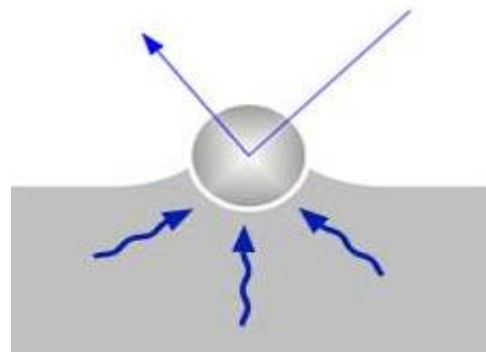
اندازه‌گیری تنش‌های پسماند و توزیع آنها در عمق قطعه از اهمیت خاصی برخوردار است. به دلیل اینکه کیفیت و میزان

فشار بسیار آهسته‌تر می‌باشد هرچه عمق سطح فشرده شده بیشتر باشد میزان مقاومت به ترک نیز بیشتر خواهد بود [۵]. از آنجائی که همیشه باید بین نیروها و تنش های موجود در یک قطعه تعادل وجود داشته باشد تا آن قطعه پایدار بماند، در قطعه‌های ساچمه زنی شده تنش های پسماند فشاری به صورتی توزیع می‌گردند که مقدار جبری تنش های پسماند تولید شده در تمام مقطع قطعه صفر گردد [۶]. به این معنی که بین تنش های پسماند تولید شده در راستای مقطع قطعه تعادل برقرار می‌شود. بنابراین از زیر سطح، جایی که مقدار تنش پسماند فشاری بیشینه است، این تنش به تدریج تغییر علامت داده تا اینکه مقدار کل تنش پسماند موجود در سطح قطعه به صفر برسد.

از عوامل موثر بر بهبود خواص مکانیکی قطعه حاصله توسط ساچمه زنی می‌توان به مقدار سرعت، اندازه، وزن و زاویه برخورد ساچمه‌ها به سطح قطعه کار نام برد. با تغییر مقدار یا جهت هر یک از این موارد، خواص مکانیکی به دست آمده از قطعه کار متغیر خواهد بود. نحوه شکل دهی نیز بدین صورت است که ساچمه‌ها با اندازه و سرعت مشخصی توسط نازل به سطح قطعه کار پرتاب شده (که ممکن است سرعت ساچمه‌ها گاهی تا  $220 \text{ m/s}$  نیز برسد) و تحت اثر این سرعت و زاویه به سطح قطعه کار برخورد می‌کنند. این برخورد، باعث ایجاد تنش پسماند فشاری در لایه سطحی قطعه کار می‌شود. با برخورد هزاران ساچمه به سطح قطعه کار، به تدریج تمام لایه سطحی قطعه کار تحت تنش فشاری ایجاد شده ناشی از برخورد ساچمه‌ها قرار می‌گیرد. البته نمی‌توان عمل ساچمه زنی را به طور کامل و  $100\%$  روی تمام سطح یک قطعه انجام داد و همیشه مقدار ناچیزی از سطح قطعه در عمل ساچمه زنی نمی‌شود. (این مقدار بنابر دقت مورد نیاز، شکل هندسی قطعه کار و امکانات در دسترس قابل کاهش است.) عموماً با تکمیل حدود  $98\%$  از

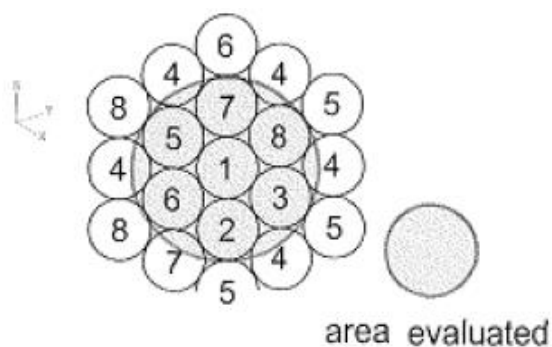
تأثیر ساچمه زنی به عوامل بسیاری از قبیل نوع و اندازه ساچمه‌ها، شدت ساچمه زنی، پوشش سطح و خواص ماده بستگی دارد. بنابراین اثر پارامترهای فرآیند ساچمه زنی بر اندازه و توزیع تنش های پسماند و همچنین تعیین شرایط لازم جهت حصول توزیع بهینه تنش‌ها بسیار قابل توجه است [۱].

هنگام برخورد ساچمه‌ها با انرژی جنبشی بالا به سطح مورد نظر، محل برخورد ساچمه در سطح فلز وارد ناحیه پلاستیک می‌شود. در حالی که لایه‌های زیرین این قسمت از سطح هنوز در حالت الاستیک قرار دارند. با بلند شدن ساچمه از سطح و برگشت الاستیک لایه‌های زیر سطح در محل برخورد ساچمه، سطح تحت تنش فشاری ناشی از این برگشت قرار می‌گیرد [۸]. شکل ۲ بیانگر ایجاد تنش های پسماند در قطعه در هنگام ساچمه زنی می‌باشد.



شکل (۲) ایجاد تنش پسماند در قطعه به هنگام ساچمه زنی [۳]

در اغلب فرآیندهای شکست زمان‌بر، عامل اصلی شکست، تنش های کششی می‌باشند [۶]. این تنش ها می‌توانند ناشی از اعمال بار خارجی و یا تنش‌های باقیمانده در اثر فرآیند ساخت (مانند جوشکاری و سنگ زنی و ...) باشند. عموماً تنش کششی تمایل دارد تا ذره‌های تشکیل دهنده قطعه را از هم دور کند و در نتیجه می‌تواند باعث ایجاد ترک شود. اما تنش فشاری باعث فشرده شدن مرز دانه‌های سطحی شده و شروع ترک را به مدت قابل ملاحظه‌ای به تاخیر می‌اندازد [۴]. از طرف دیگر از آنجایی که رشد ترک در ناحیه تحت



شکل (۳) تحلیل ساچمه زنی با در نظر گرفتن سطح ۷ ساچمه [۳]

در این پژوهش به بررسی رفتار خستگی نمونه‌های ساچمه زنی شده در مقایسه با نمونه‌های فاقد ساچمه زنی و اندازه-گیری تنش‌های پسماند ایجاد شده در سطح کار، تعیین میزان عمق نفوذ ساچمه از طریق بررسی پروفیل ریز سختی و شبیه سازی با نرم افزار ANSYS، با دو سرعت مختلف برخورد، با واحد در نظر گرفتن سطح یک ساچمه برای تحلیل پرداخته شده است.

## ۲- آزمایش‌های تجربی

هدف از انجام آزمایش‌هایی که در ادامه شرح داده می‌شود، بررسی اثر ساچمه زنی در رفتار خستگی است. از این رو در این تحقیق از نمونه‌های آزمایش فولاد CK35 (DIN 1.1181) که در انواع صنایع کاربرد فراوان دارد استفاده شده است. جدول ۱ بیانگر ترکیب شیمیایی مواد متشکل فولاد مورد نظر است.

جدول (۱) درصد عناصر شیمیایی در فولاد CK35

عنصر	C	Cr	Co	Si	Mn
wt%	۰/۳۵۳	۰/۳۸۱	۰/۰۱۱	۰/۱۴۷	۰/۵۷۳
عنصر	Pb	S	Cu	Ni	Mo
wt%	۰/۳۵۱	۰/۰۲۲	۰/۲۶۱	۰/۱۴۳	۰/۰۶۶

برای اینکه بتوان میزان اثر تنش پسماند تشکیل یافته در اثر ساچمه زنی را بر رفتار خستگی نمونه‌ها مشاهده کرد، سه دسته از نمونه با کدهای a, b, c تهیه می‌شود. دسته a را با

ساچمه زنی سطح قطعه کار، می‌توان گفت که ساچمه زنی کامل انجام گرفته و خواص مکانیکی قطعه بهبود یافته است. با این عمل در واقع کار سختی صورت گرفته است.

برای شبیه سازی فرآیند ساچمه زنی راه‌های متفاوتی ارائه شده است. به عنوان مثال مجذوبی و همکارش [۹] ساچمه را به شکل الاستیک فرض کردند که نتایج آن‌ها در مقایسه با یافته‌های تجربی از دقت بالایی برخوردار بودند. زیون [۱۰] رفتار ساچمه را الاستیک-پلاستیک در نظر گرفت و نتایج حاصل در مقایسه با داده‌های تجربی از دقت قابل قبولی برخوردار شد.

محققین در مدل سازی‌های خود از دو روش دو بعدی و سه بعدی و با تعداد مش‌بندی‌های مختلف استفاده کرده‌اند. برای مثال چاورزر و همکارانش [۳] مش‌بندی را از نوع سه بعدی و با ۳۷۲۰۰۰ شبکه و با ۸ گره در نظر گرفتند. بویس و همکارانش [۱۱] مش‌بندی را از نوع دو بعدی و با ۴۰۰۰ مش و ۸ گره مدل سازی کرد.

تحلیل تنش پسماند و تخمین عمق نفوذ در فرآیند ساچمه زنی را با در نظر گرفتن سطوح مختلفی از سطح ساچمه زنی شده در قطعه می‌توان انجام داد. چاورزر و همکارانش [۳] تحلیل فرآیند ساچمه زنی را برای محل برخورد ۷ ساچمه در قطعه کار انجام دادند. شکل ۳ نشان دهنده محدوده واحد این تحلیل در سطح قطعه کار است. مجذوبی و همکارش [۹] بسامد تحلیل را برای ۴ ساچمه در نظر گرفتند. گاکلینو و همکارانش [۱۲ و ۱۳] تحلیل تنش پسماند ایجاد شده در قطعه را برای اثر به‌جا مانده از یک ساچمه بررسی کرد و معتقد بود محدوده تغییرها در تنش پسماند برای تحلیل بسامدهای مختلف کمتر از ۱۵٪ با یکدیگر تفاوت دارد.

سه نمونه، رفتار هر سه گروه در برابر بارگذاری خستگی بررسی و مقایسه شد.

### ۳- فرضیه‌های مورد استفاده در اندازه‌گیری

#### مقادیر تنش پسماند با نرم افزار ANSYS

از آنجا که کلیه فرآیند ساچمه زنی به شکل متقارن بوده، برای راحتی در فرآیند شبیه سازی نصف مدل برای حل در نظر گرفته شده است. همچنین از فرضیه‌های زیر استفاده شده است:

۱- رفتار نمونه در فرآیند شبیه‌سازی به شکل الاستیک-پلاستیک فرض شده است.

۲- از اثرهای حرارتی صرف نظر شده است.

۳- قطر ساچمه‌ها ثابت و یکسان در نظر گرفته شده و رفتار آنها به شکل صلب - الاستیک فرض شده است.

۴- نحوه برخورد ساچمه‌ها به قطعه عمود فرض شده است.

۵- نحوه تحلیل در طول فرآیند شبیه سازی از نوع دینامیکی است.

۶- ضریب اصطکاک در طول شبیه سازی ثابت فرض شده است.

۷- برای راحتی در فرآیند شبیه سازی، قطعه و ساچمه به شکل دو بعدی فرض شده‌اند.

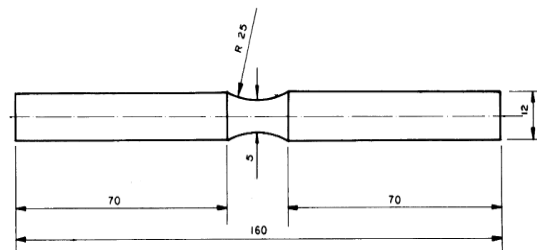
۸- شرایط مرزی به نحوی انتخاب شده است که همواره شرایط تقارن را برقرار نماید.

۹- با فرض اینکه تنها یک سطح تماس وجود دارد از گزینه بخش ساده<sup>۲</sup> استفاده شده است.

واحدهای چگالی برحسب  $\text{Ton/mm}^2$  مدول الاستیک و تنش تسلیم برحسب MPa و کلیه ابعاد برحسب mm محاسبه شده‌اند. برای حل مسئله از المان‌های ۴ وجهی استفاده شده است و جهت افزایش دقت حل، در محل برخورد ساچمه با قطعه از المان بندی ریزتری استفاده شده

شدت  $100\text{m/s}$ ، دسته b را با شدت  $200\text{m/s}$  بمباران و دسته c را بدون انجام فرآیند ساچمه زنی، مورد آزمایش تست خستگی قرار داده و نتایج آن بررسی و با یکدیگر مقایسه شد. برای این منظور هر سه گروه از ابتدا به شکل خشن ماشینکاری شده و پس از آن به پرداخت نهایی می‌رسند.

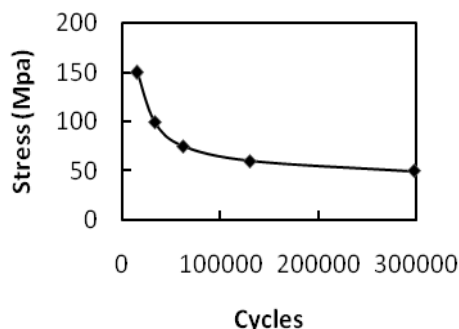
نمونه‌ها در دمای  $300^\circ\text{C}$  پیش گرم و سپس در دمای  $1000^\circ\text{C}$  به مدت ۴۰ دقیقه حرارت داده شده تا ریز ساختار آنها به آستنیت تبدیل شود. پس از آن و برای دستیابی به فاز مارتنزیت و افزایش سختی، نمونه‌ها در روغن داغ سریع سرد می‌شوند. به منظور پایدارسازی ریز ساختار تشکیل شده، نمونه‌ها در دمای  $400^\circ\text{C}$  و به مدت ۳۰ دقیقه گرم می‌شوند. پس از اتمام عملیات حرارتی، نمونه‌ها ماشین کاری نهایی می‌شوند و تا دقت  $3\ \mu\text{m}$  پولیش می‌شوند تا آماده انجام عملیات ساچمه زنی شوند. شکل ۴ بیانگر ابعاد نمونه‌ها برحسب cm است.



شکل (۴) ابعاد نمونه‌های مورد آزمایش تست خستگی

نمونه‌های a و b با استفاده از دستگاه ساچمه زنی توربینی و ساچمه‌های استاندارد S230 طوری ساچمه زنی می‌شوند که برخورد ساچمه‌ها حتی المقدور به‌طور عمود بر سطح کار صورت پذیرد و نزدیک به ۱۰۰٪ سطح نیز مورد عملیات ساچمه زنی قرار گیرد.

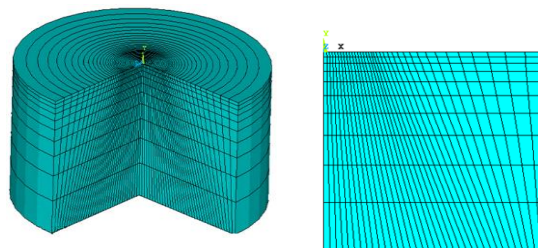
آزمایش‌های خستگی توسط دستگاه خستگی خمشی - دورانی<sup>۱</sup> انجام شد. بسامد بارگذاری  $1600\ \text{rpm}$  و مقدار خروج از محور بارگذاری و شفت انتقال کمتر از  $0.04$  میلیمتر بود. پس از انجام آزمایش‌های خستگی بر روی هر



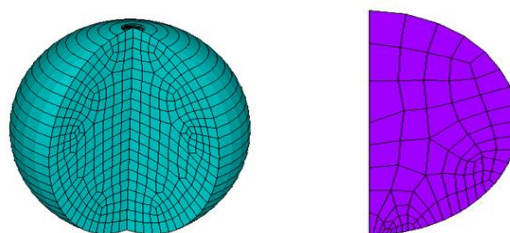
شکل (۸) نمودار تنش- عمر نمونه c

آنچنان که از شکل‌های ۶ تا ۸ بر می‌آید، استحکام خستگی نمونه‌ها در اثر ساچمه زنی با شدت برخورد  $100 \text{ m/s}$  ساچمه‌ها نسبت به نمونه‌های ساچمه زنی نشده تا حدود ۲۵٪ بهبود یافته است. در نمونه‌هایی که شدت برخورد ساچمه‌ها  $200 \text{ m/s}$  بود، استحکام خستگی بیش از ۴۰٪ بهبود یافته است. این موضوع بیانگر بهبود قابل توجه استحکام خستگی در نمونه‌ها است. دلیل این امر این است که جوانه زنی ترک خستگی بدون انجام فرآیند ساچمه زنی زودتر اتفاق می‌افتد؛ زیرا قطعه کار دارای سطح نرمتری بوده و در نتیجه احتمال جوانه زنی ترک نسبت به نمونه‌های ساچمه زنی شده بیشتر خواهد بود [۱۶-۱۴]. از طرفی تنش پسماند فشاری القاء شده در سطح نمونه‌های ساچمه زنی شده باعث کاهش دامنه تنش متناوب ناشی از بارگذاری می‌شود. همچنین این تنش پسماند فشاری القاء شده در کند کردن نرخ رشد ترک نیز بسیار موثر است؛ بنابراین عمر خستگی افزایش می‌یابد. نتایج تحقیق‌های پیشین نیز مؤید بهبود این خاصیت مکانیکی در سایر آلیاژهای تست شده بود [۴ و ۵]. با آزمایش‌های مختلف بر روی انواع آلیاژها و جمع بندی نتایج آنها احتمالاً می‌توان به رابطه‌ای بین سرعت ضربه ساچمه‌ها، میزان عیوب موجود در نمونه‌ها و استحکام خستگی ایجاد شده در آنها دست یافت. در این پژوهش با توجه به اینکه سرعت ساچمه‌ها تنها در دو بازه بررسی شدند و نیز تنها از یک مدل

است. شکل ۵ نوع المان بندی را به تفکیک برای قطعه و ساچمه به صورت دو بعدی و سه بعدی نشان می‌دهد.

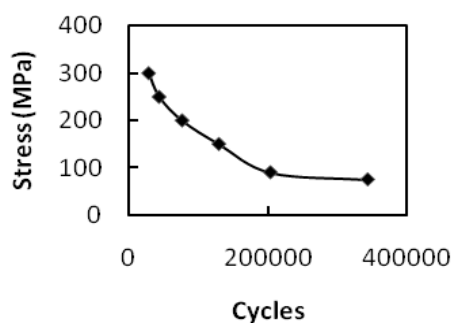


الف) المان بندی دو بعدی قطعه      ب) المان بندی سه بعدی قطعه

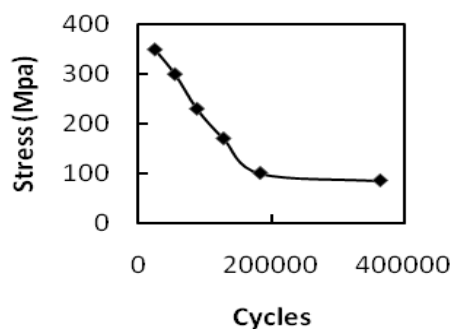
ج) المان بندی دو بعدی ساچمه      د) المان بندی سه بعدی ساچمه  
شکل (۵) المان بندی قطعه و ساچمه به صورت دو بعدی و سه بعدی

#### ۴- بحث در نتایج

با توجه به نتایج تست‌های استحکام خستگی، نمودارهای تنش- عمر نمونه‌ها در شکل‌های ۶ و ۷ و ۸ نشان داده شده است.



شکل (۶) نمودار تنش- عمر نمونه a

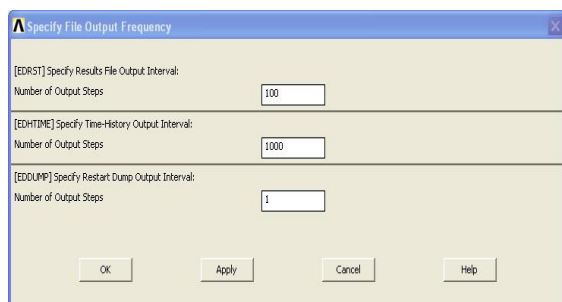


شکل (۷) نمودار تنش- عمر نمونه b

تحلیل و تعداد حل‌های مسأله برای برخورد سرعت ساچمه معادل  $100 \text{ m/s}$  در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ قابل مشاهده است.



شکل (۱۰) مقدار زمان انجام حل مسئله

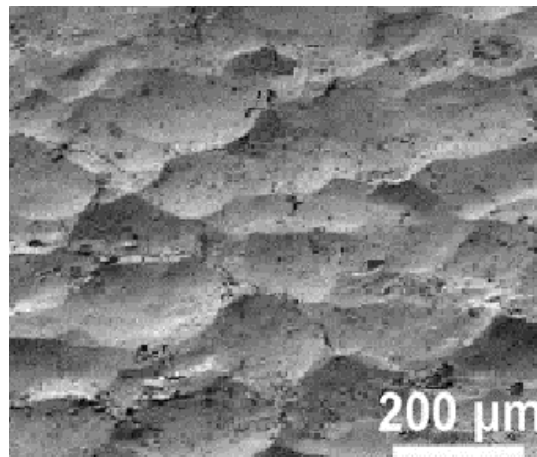


شکل (۱۱) تعداد حل‌های انجام شده مسئله

مقادیر تنش پسماند در هنگام برخورد و پس از برخورد برحسب تنش‌های ون میزس و تنش اصلی در شکل ۱۲ نشان داده شده است. چنانچه در شکل ۱۲-ب مشاهده می‌شود، در حین برخورد ساچمه با سرعت  $200 \text{ m/s}$ ، تنش اصلی سوم، به صورت فشاری معادل  $304 \text{ MPa}$  بر قطعه بوده که تا پایان شکل‌گیری فرآیند، مقدار این تنش افزایش و پس از برخورد به تنش فشاری معادل  $331 \text{ MPa}$  (شکل ۱۲-د) می‌رسد.

همان‌گونه که در شکل ۱۲-ی مشاهده می‌شود، در برخورد ساچمه با سرعت  $100 \text{ m/s}$ ، تنش پسماند فشاری معادل  $266 \text{ MPa}$  به سطح قطعه کار القاء می‌شود و این تنش در سطح خارجی قطعه باقی خواهد ماند.

نمونه استفاده شده، نمی‌توان در این خصوص اظهار نظر قطعی کرد. شکل ۹ تصویر سطح ساچمه زنی شده با سرعت برخورد  $200 \text{ m/s}$  ساچمه‌ها را نشان می‌دهد. افزایش پستی بلندی‌های ناشی از ساچمه زنی در میکروساختار قطعه، زمینه مناسبی برای جوانه زنی ترک‌های خستگی ایجاد می‌کند. اما اثرهای مثبت کار سختی انجام شده بسیار بیشتر از وجود این بستر جوانه زنی تاثیرگذار است.

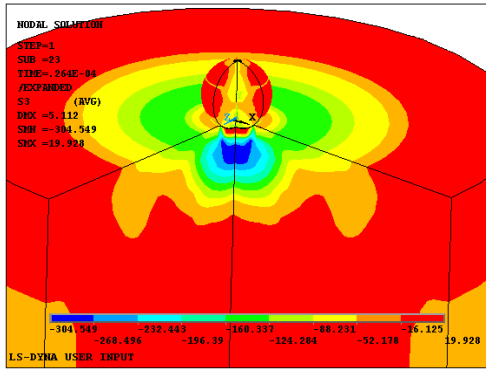


شکل (۹) تصویر سطح ساچمه زنی شده با سرعت برخورد  $200 \text{ m/s}$  ساچمه‌ها

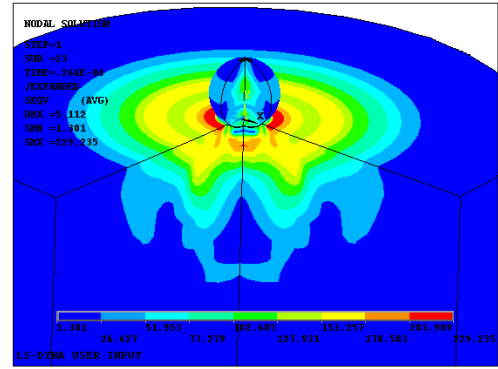
با اعمال کار سرد روی نمونه‌ها نابجایی‌ها در سطح انباشته گشته، باعث بسته شدن شیارهای سطحی می‌گردند. از طرفی وجود شیارهای سطحی از عمده‌ترین عوامل جوانه زنی ترک‌های منجر به شکست خستگی هستند. بسته شدن این شیارها شکست ناشی از خستگی را به تعویق می‌اندازد.

به دلیل القاء تنش پسماند فشاری و انباشتگی نابجایی‌های سطحی در نمونه‌های ساچمه زنی شده، رشد ترک‌های جوانه زده شده با سرعت کمتری انجام گرفته و این موضوع نیز باعث افزایش عمر خستگی نمونه‌ها می‌گردد.

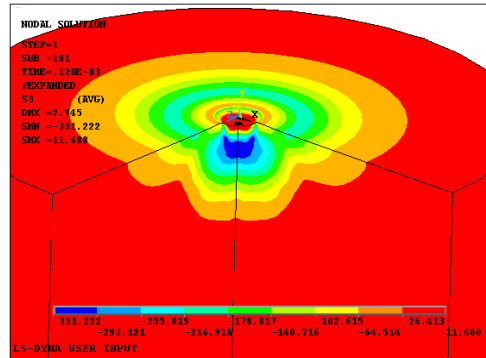
برای اندازه‌گیری مقدار تنش پسماند ایجاد شده طی فرآیند ساچمه زنی، در نرم افزار به ساچمه سرعت‌هایی معادل  $100 \text{ m/s}$  و  $200 \text{ m/s}$  داده می‌شود و مسأله حل می‌گردد. زمان



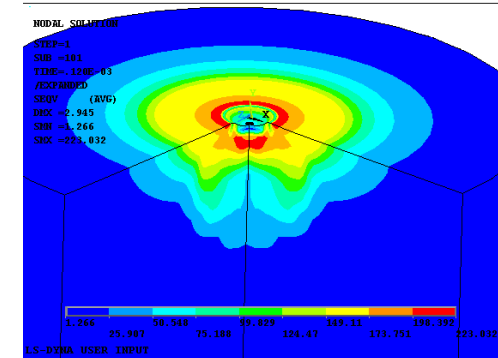
ب) مقادیر تنش اصلی نمونه b در زمان برخورد برای ۲۰۰ m/s



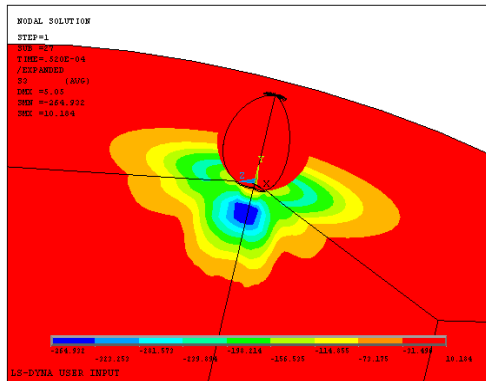
الف) مقادیر تنش ون میزس نمونه b در زمان برخورد برای ۲۰۰ m/s



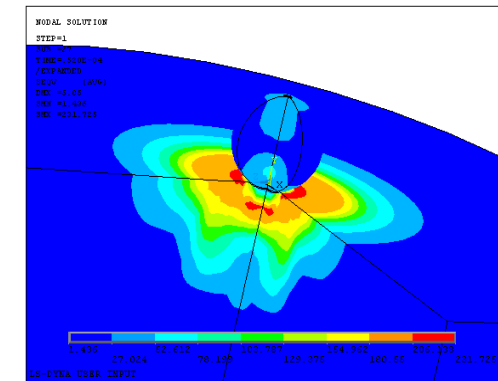
د) مقادیر تنش اصلی نمونه b در انتهای حل برای ۲۰۰ m/s



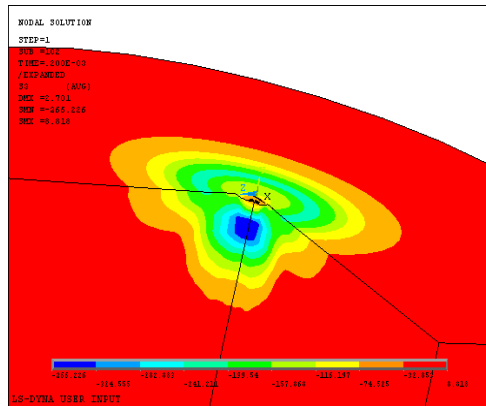
ج) مقادیر تنش ون میزس نمونه b در انتهای حل برای ۲۰۰ m/s



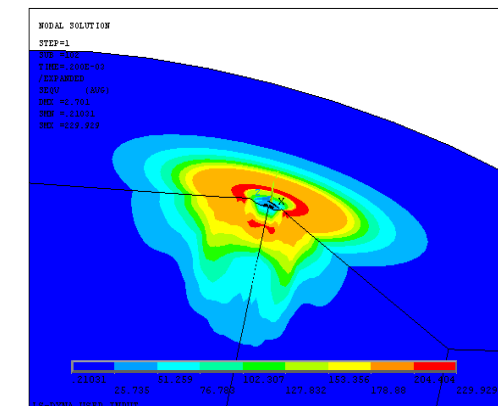
و) مقادیر تنش اصلی نمونه a در زمان برخورد برای ۱۰۰ m/s



ز) مقادیر تنش ون میزس نمونه a در زمان برخورد برای ۱۰۰ m/s



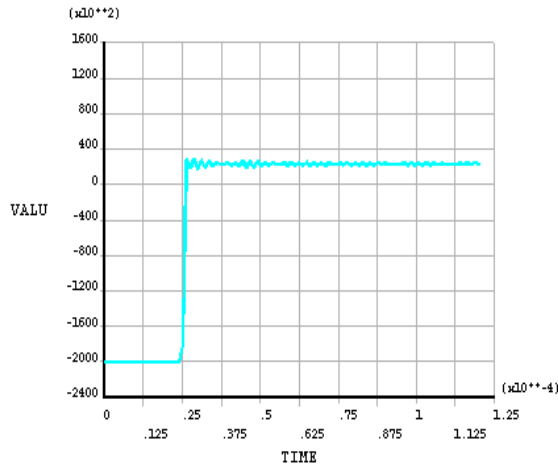
ی) مقادیر تنش اصلی نمونه a در انتهای حل برای ۱۰۰ m/s



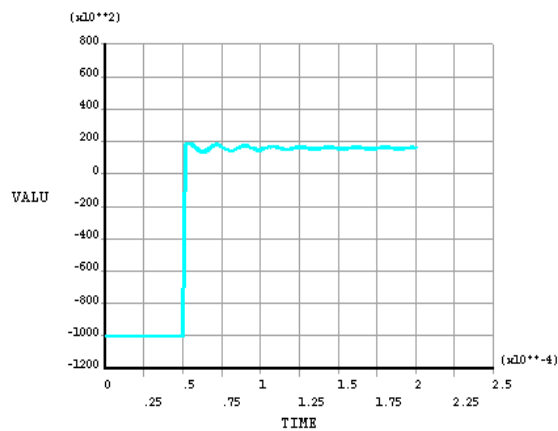
ه) مقادیر تنش ون میزس نمونه a در انتهای حل برای ۱۰۰ m/s

شکل (۱۲) مقادیر میانگین تنش پسماند در هنگام برخورد و پس از برخورد برحسب تنش های ون میزس و اصلی در نمونه های ساچمه زنی شده.





شکل (۱۴) نمودار رفت و برگشت سرعت ساچمه برای ۲۰۰ m/s



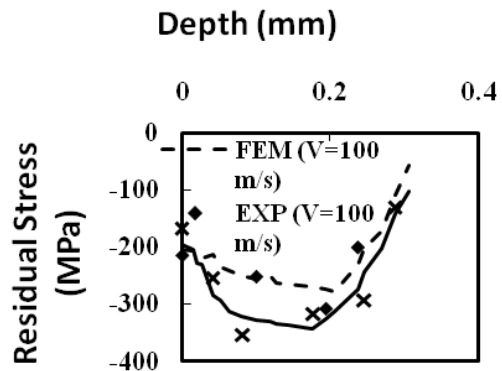
شکل (۱۵) نمودار رفت و برگشت سرعت ساچمه برای ۱۰۰ m/s

آنچنان که از شکل‌های ۱۴ و ۱۵ بر می‌آید، سرعت ساچمه در هنگام بازگشت تقریباً به یک پنجم سرعت اولیه کاهش می‌یابد. به نظر می‌رسد این میزان تغییرها با نتایج حاصل از مشاهده‌های تجربی نیز نزدیک باشد.

از آنجایی که به ساچمه‌ها نیز در حین انجام فرآیند تنش وارد می‌شود، میزان این تنش در هنگام برخورد ساچمه با سرعت ۲۰۰ m/s به قطعه در شکل ۱۶ نشان داده شده است.

از مقایسه مقادیر تنش‌های ون میزس و تنش‌های اصلی در شکل ۱۲ این مفهوم بر می‌آید که مقادیر تنش‌های اصلی همواره بیش از مقادیر تنش‌های ون میزس است. دلیل این موضوع فشاری بودن تنش‌ها است. در نتیجه، معیار اصلی، تنش‌های اصلی سوم خواهند بود.

با بررسی پروفیل ریز سختی نمونه‌ها و به‌کارگیری روش اجزاء محدود، وابستگی مقادیر تنش تسلیم و عمق نفوذ ساچمه‌ها در سطح کار ناشی از عملیات ساچمه زنی در شکل ۱۳ با یکدیگر مقایسه شده‌اند. این مقادیر نشان دهنده افزایش مقدار تنش تسلیم تا عمق‌های مختلف نفوذ و پس از آن نزول اندک آن است. چنانچه در دیگر پژوهش‌ها نیز مشابه این رفتار مشاهده شده است [۴ و ۵].



شکل (۱۳) نمودار تنش تسلیم - عمق نفوذ

میانگین نمودار سرعت ساچمه در طول انجام فرآیند رفت و برگشت برای سرعت‌های ۱۰۰ و ۲۰۰ متر بر ثانیه در شکل ۱۴ و ۱۵ قابل ملاحظه است.

برای نمونه‌های a، کمتر از  $250 \mu\text{m}$  و برای نمونه‌های b، در حدود  $300 \mu\text{m}$  است.

۳- استحکام خستگی نمونه‌ها در اثر ساچمه‌زنی با سرعت برخورد  $100 \text{ m/s}$  ساچمه‌ها نسبت به نمونه‌های ساچمه‌زنی نشده تا حدود  $25\%$  و در نمونه‌های با سرعت  $200 \text{ m/s}$  بیش از  $40\%$  بهبود یافته است.

۴- میزان تنش پسماند ایجاد شده در نمونه‌هایی که ساچمه‌ها با سرعت  $200 \text{ m/s}$  به سطح برخورد کرده بیش از  $300 \text{ MPa}$  و در نمونه‌ها با سرعت برخورد  $100 \text{ m/s}$  این مقدار در حدود بیش از  $250 \text{ MPa}$  است.

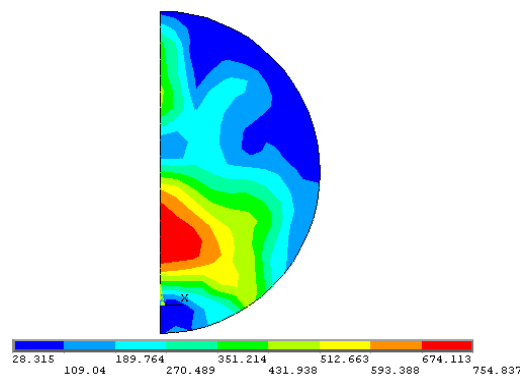
۵- سرعت برگشت ساچمه‌ها، پس از انجام فرآیند ساچمه‌زنی حدود  $\frac{1}{5}$  سرعت اولیه آنها در هر هنگام برخورد است. ۶- میزان تنش ایجاد شده در ساچمه‌ها در حدود دو برابر مقدار تنش پسماند ایجاد شده در قطعه است.

#### ۶- تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله از گروه تخصصی شهید رجایی و سرکار خانم رحیمی به خاطر انجام همکاری‌های لازم کمال تشکر و قدردانی را به عمل می‌آورند.

#### ۷- مراجع

- [1] Metals Handbook, *Shot Peening*, Vol. 9, 1982.
- [2] Eleiche A.M., Megahed M.M., Abd- Allah N.M., The Shot Peening Effect on the HFC Behavior of High Strength Martensitic Steels, *Journal of Material Processing Technology*, vol. 113, 2002, pp. 604-608.
- [3] Schwarzer J., Schulze V., Vohringer O., Finite Element Simulation of Shot Peening- A Method to Evaluate the Influence of Peening Parameters on Surface Characteristics, Proceedings from International Conference of Shot Peening, ICSP-8, Munich, Germany.
- [4] Oguri K., Fatigue life enhancement of aluminum alloy for aircraft by Fine Particle Shot Peening (FPSP), *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 211, 2011, pp. 1395-1399.



شکل (۱۶) میزان تنش ایجاد شده در ساچمه در هنگام برخورد با قطعه در سرعت  $200 \text{ m/s}$

چنانچه از شکل ۱۶ برمی‌آید، میزان تنش ایجاد شده در ساچمه بیش از دو برابر مقدار تنش القاء شده به قطعه است. این مقدار برای نمونه‌هایی که در آن ساچمه‌ها با سرعت  $100 \text{ m/s}$  به سطح قطعه برخورد می‌کنند نیز در حدود دو برابر مقدار تنش القاء شده به سطح قطعه می‌باشد. دلیل این موضوع احتمالاً به نسبت وجود نابجایی‌های موجود در ساچمه‌ها در مقایسه با این مقدار در نمونه‌ها مربوط می‌شود. از آنجایی که وجود نابجایی‌های سطحی در سطح صیقلی شده ساچمه‌ها در مقایسه با سطح نمونه‌ها بسیار ناچیز می‌باشد، سبب آن می‌شود که مقداری از تنش القا شده در نمونه‌ها صرف از بین بردن این نابجایی‌ها شود؛ در حالی که این مقدار تنش در ساچمه‌ها صرف انجام چنین کاری نمی‌گردد و در ساچمه القا می‌شود.

#### ۵- نتیجه گیری:

- ۱- در اثر فرآیند ساچمه‌زنی، کیفیت سطح تخریب شده و زبری سطح به مقدار زیادی افزایش می‌یابد. اما اثرهای منفی آن در برابر اثرهای مثبت کار سختی ناچیز است.
- ۲- با بررسی پروفیل ریز سختی و استفاده از روش اجزاء محدود، حداکثر میزان عمق نفوذ ساچمه‌ها در سطح کار

- [5] Zhang P., Lindemann J., Influence of shot peening on high cycle fatigue properties of the high-strength wrought magnesium alloy AZ80, *Scripta Materialia*, vol. 52, 2005, pp. 485-490.
- [6] Tekeli S., Enhancement of fatigue strength of SAE 9245 steel by shot peening, *Materials Letters*, vol. 57, 2002, pp.604-608.
- [7] Zhan K., Jiang C.H., Effect of prestress state on surface layer characteristic of S30432 austenitic stainless steel in shot peening process, *Materials & Design*, vol. 42, 2012, pp. 89-93.
- [8] Miao H.Y., 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*, vol. 40, 2009, pp. 1023-1038.
- [9] Majzoubi G.H., Azizi R., three-D numerical method of shot peening process using multiple shot impacts, Proceeding ISCP-9, 2005, Paris, France.
- [10] Zoin H. L., a dynamic finite element simulation of the shot-peening Process, Ph.D. thesis, Georgia Institute of technology, USA, 2003.
- [11] Boyce B.L., Chen X., Hutchinson J.W., Ritchie R.O., the residual stress state due to a spherical hard-body impact., *Mechanics of Materials*, vol. 33, 2001, pp. 441-454.
- [12] Guagliano M., Vergani L., Bandini M., Gili F., an approach to relate the shot peening parameters to the induced residual stresses, Proceeding ISCP-9, 1999, Warsaw, Poland.
- [13] Guagliano M., Relating Almen intensity to residual stresses induced by shot peening: a numerical approach, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 110, 2001, pp. 277-286.
- [14] Luo J., Harding R.A., Bowen P., evaluation of the fatigue behavior of ductile irons with various matrix microstructures, *Metallurgical and materials transaction*, vol. 33, 2002, pp. 3719-3730.
- [15] Dai P.Q., He R.Z., Wu W.Q. Mao Z.Y., Mechanical behavior of graphite in fracture of austempered ductile iron, *Materials Science and technology*, vol. 18, 2002, pp. 1052-1056.
- [16] Hong T., Ooi J.Y., Shaw B., A numerical simulation to relate the shot peening parameters to the induced residual stresses, *Engineering Failure Analysis*, vol. 15, 2008, pp. 1097-1110