



## اثر فرآیند پرس کاری در کانال‌های هم مقطع زاویه‌دار (ECAP) بر تغییرات ریزساختاری چدن نشکن

جعفر بهادری فلاح، دانشجویی کارشناسی ارشد، مهندسی مواد، دانشگاه فردوسی مشهد

علیرضا کیانی رشید، استاد گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه فردوسی مشهد

محمدحسن فرشیدی، استادیار گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه فردوسی مشهد

### چکیده

پرس کاری در کانال‌های هم مقطع زاویه‌دار یکی از مؤثرترین فرایندهای تغییر شکل پلاستیکی شدید برای تولید مواد فوق ریزدانه و حتی نانو ساختار است. چدن‌ها به دلیل خواص جذابی که دارند مانند سهولت ریخته‌گری، مقاومت به خوردگی مناسب و برخی خواص ویژه نظیر خودروانکاری و جذب ارتعاش در صنایع گوناگون کاربرد گسترده‌ای دارند. باین وجود، حضور گرافیت در چدن‌ها به دلیل نرمی این فاز و تمرکز تنش ناشی از آن، سبب افت برخی از خواص مکانیکی نظیر استحکام و انعطاف‌پذیری آن‌ها می‌گردد. در این مطالعه اثر فرایند ایکپ بر ریزساختار چدن نشکن مورد بررسی قرار گرفت، بدین منظور که با اعمال تغییر شکل شدید، شکل ذرات گرافیت و اندازه آن‌ها تغییر کرد. قطعه کار با سطح مقطع دایره‌ای در قالبی با زاویه کانال  $90^\circ$  در دمای  $550^\circ\text{C}$  طی یک گذر تحت پرس قرار گرفت و اثرات آن بر ریزساختار چدن و شکل و اندازه ذرات گرافیت مطالعه شد. آزمایشات نشان می‌دهد که با عبور نمونه چدنی از کانال تغییرات جدی در شکل گرافیت‌ها ایجاد شده و به‌ویژه در قسمت‌های میانه نمونه این تغییرات محسوس‌تر می‌باشد.

**کلیدواژه‌ها:** تغییر شکل شدید، پرس کاری در کانال‌های هم مقطع زاویه‌دار، ریزساختار، فوق ریزدانه، تمرکز تنش



## 1- مقدمه

چدن‌ها به‌عنوان یکی از قدیمی‌ترین آلیاژهای آهنی، کاربرد گسترده‌ای در صنایع گوناگون دارند که این امر به دلیل برخی خواص جذاب آن‌ها مانند سهولت در ریخته‌گری، مقاومت به خوردگی مناسب و برخی خواص ویژه نظیر خودروانکاری و جذب ارتعاش هست. با این وجود، حضور گرافیت در چدن‌ها به دلیل نرمی این فاز و تمرکز تنش ناشی از آن، سبب افت برخی از خواص مکانیکی این گروه از آلیاژهای آهنی نظیر استحکام و انعطاف‌پذیری آن‌ها می‌گردد و معمولاً خواص مکانیکی چدن‌ها نسبت به سایر آلیاژهای پایه آهنی، نظیر فولادهای کم‌کربن، به طرز چشمگیری پایین‌تر است. با تغییر شکل ذرات گرافیت و افزایش کرویت این ذرات با روش‌های گوناگون نظیر عملیات حرارتی و افزودن فلزات قلیایی خاکی به مذاب، می‌توان کرویت ذرات گرافیت را افزایش داد و بهبود چشمگیری در استحکام و انعطاف‌پذیری چدن‌ها ایجاد کرد. به‌طور مثال معمولاً با افزودن حدود 0/05 درصد وزنی منیزیم به مذاب، چدن با گرافیت کروی تولید می‌شود که استحکام قابل توجه و انعطاف‌پذیری نسبتاً بالا در حدود 10 درصد دارد. از سوی دیگر، علاوه بر شکل ذرات گرافیت، اندازه این ذرات نیز اثر قابل توجهی بر خواص مکانیکی این مواد دارد و به‌منظور بهبود خواص مکانیکی چدن‌ها، باید ساختار این مواد به نحوی کنترل شود که اندازه ذرات گرافیت تا حد ممکن کاهش یابد. در این راستا، یکی از روش‌های پیشنهادشده برای اصلاح ریزساختار چدن‌ها، اعمال تغییر شکل شدید است و پژوهش‌هایی بر روی بهبود ساختار چدن‌های نشکن با اعمال فرآیندهای تغییر شکل شدید صورت گرفته است [1].

رابطه هال-پچ بیان می‌کند که استحکام مواد پلی کریستال به‌اندازه دانه وابسته است به‌طوری که با کاهش اندازه‌ی دانه بر میزان تنش تسلیم افزوده می‌شود [2،3]:

$$\sigma_y = \sigma_0 + K_y d^{-\frac{1}{2}} \quad \text{رابطه 1}$$



که در آن  $\sigma_y$  تنش تسلیم،  $\sigma_0$  تنش اصطکاکی،  $K_y$  ثابت تسلیم و  $d$  اندازه دانه است. به منظور تبدیل یک ماده درشت‌دانه به یک ماده فوق ریزدانه ضروری است که هم کرنش بسیار بالا برای ایجاد چگالی بالایی از نابجایی‌ها اعمال شود و هم اینکه این نابجایی‌ها جهت آرایش مرزهای دانه، مرتب‌سازی مجدد شوند. ایجاد کرنش‌های زیاد می‌تواند توسط فرایندهایی موسوم به تغییر شکل پلاستیکی شدید ( $SPD^1$ ) صورت پذیرد. طی این فرایندها عموماً کرنش بسیار زیاد به بلوکی جامد وارد می‌شود به طوری که بدون تغییر ابعاد کلی جامد، ریز شدگی دانه در آن اتفاق می‌افتد [4].

پرس‌کاری در کانال‌های هم مقطع زاویه‌دار ( $ECAP^2$ ) به عنوان یکی از مؤثرترین فرایندهای تغییر شکل پلاستیکی شدید برای دستیابی به ساختارهای فوق ریزدانه ( $UFG^3$ ) و افزایش استحکام فلزات و آلیاژها شناخته می‌شود [4-6]. در فرایند ایکپ نمونه از میان دو کانال با سطح مقطع یکسان که دارای تقاطع تحت زاویه  $\phi$  و زاویه گوشه  $\psi$  می‌باشند، با استفاده از نیروی پرس عبور داده می‌شود [7-8]. از آنجاکه سطح مقطع نمونه بعد از تغییر شکل ثابت باقی می‌ماند، می‌توان نمونه را مجدداً با چرخش 90 و یا 180 درجه در هر جهت، ایکپ کرد [9]. در حین فرایند، در اثر برش ساده در محل تقاطع، نمونه تحت یک کرنش پلاستیک شدید واقع می‌شود [10]. در بیشتر آلیاژها بعد از اولین گذر ایکپ، تأثیر چشمگیری بر میزان استحکام تسلیم و نهایی ماده مشاهده می‌شود که این افزایش استحکام با روند کندی در گذرهای بعدی ادامه می‌یابد. تغییر فرم پلاستیک شدید در نمونه‌های فلزی روشی است که در قالب عملیات پرس یا نورد انجام می‌پذیرد اما در مورد چدن‌ها تحقیقات کمی در این مورد صورت پذیرفته است که علت این امر مشکل بودن رسیدن به قطعه نهایی بدون ترک است. در مورد قطعات چدنی تأثیر تغییر فرم شدید و دمای بالا بر فاز گرافیت و زمینه و نیز تأثیر متقابل خواص مکانیکی هر یک از این اجزا در رفتار تغییر فرم چدن بررسی گردیده است [11-15].

<sup>1</sup> Severe Plastic Deformation

<sup>2</sup> Equal Channel Angular Pressing

<sup>3</sup> Ultra-Fine Grain



محققان همواره در تمامی تحقیقات صورت گرفته در مورد شکل پذیری چدن‌ها، بر نقش پراهمیت فاز گرافیت و تأثیرپذیری آن از فرایندهای شکل‌دهی و عملیات حرارتی بر ویژگی‌های چدن تأکید داشته‌اند [16-22].

به دلیل مشکل بودن رسیدن به قطعه نهایی بدون ترک و از آنجاکه مطالعه‌ای در ارتباط با تغییر شکل چدن نشکن توسط فرایند ایکپ گزارش نشده است، این ماده به‌عنوان ماده هدف جهت بررسی تأثیر فرایند ایکپ بر ریزساختار آن انتخاب شد. در تحقیق حاضر، چدن نشکن با سطح مقطع دایره‌ای در قالبی دایره‌ای با زاویه‌ی کانال 90 درجه در یک گذر تحت فرایند ایکپ قرار داده شد و تغییرات ریزساختاری آن بررسی شد.

## 2- مواد و روش تحقیق

### 2-1 ماده اولیه

در این پژوهش نمونه‌هایی از میلگرد فولادی CK45 موجود در بازار به‌عنوان غلاف به قطر 10 میلی‌متر و با ترکیب اسمی مطابق با جدول 1 تراشکاری شد. این غلاف با تراشیدن درون استوانه میلگرد اصلی به قطر داخلی 4 میلی‌متر و برش دادن طولی میلگرد به طول 50 میلی‌متر تهیه شد. در شکل 1 تصویر شماتیکی از غلاف و نمونه چدنی قرار داده‌شده درون غلاف آمده است.

جدول 1: ترکیب اسمی فولاد CK45 استفاده‌شده به‌عنوان غلاف

Fe	Ni	Mo	Cr	Mn	Si	C	ترکیب شیمیایی
باقی	<0/40	<0/10	<0/40	0/65	<0/40	0/46	درصد وزنی



شکل 1: (a) شماتیکی از تصویر غلاف فلزی از جنس CK45 (b) نمونه قرار داده شده در غلاف.

در این تحقیق نمونه آزمایش چدن نشکن بود که با استفاده از شارژ قراضه‌های موجود در بازار و افزودن عناصر اضافی موردنیاز مانند منیزیم و سیلیسیم و سایر عناصر اضافی برای تولید گرافیت کروی تحت استاندارد عناصر مجاز ترکیب شیمیایی چدن SG40 مطابق با استاندارد ASTM A536 1993 تهیه گردید. به منظور اسپکترومتری چدن مورد آزمایش، نمونه شاهدی از مذاب برای تولید پولکی و مشخص شدن آنالیز شیمیایی تهیه شد و به آزمایشگاه رازی فرستاده شد. ترکیب شیمیایی مذاب به دست آمده در جدول 2 ارائه شده است.

جدول 2: ترکیب شیمیایی مذاب مورد استفاده در تحقیق

Mg	Mo	Cr	S	P	Mn	Si	C	عنصر
0/051	0/01	0/05	0/056	0/027	0/39	2/90	3/31	درصد وزنی
W	V	Ti	Nb	Cu	Co	Al	Ni	عنصر
<0/01	0/007	0/014	0/005	0/054	0/003	0/014	0/05	درصد وزنی
Fe	La	As	Bi	Zn	Zr	Ce	Sn	عنصر
مابقی	0/005	<0/003	<0/007	0/003	0/006	0/01	0/016	درصد وزنی

برای انجام فرایند ایکپ ماشین کاری در راستای محور اکستروژن شمش اولیه انجام شد و نمونه‌های با طول تقریبی 50 میلی‌متر و با سطح مقطع دایروی با قطر 4 میلی‌متر تهیه شد. نمونه‌های ریخته‌گری شده سپس به منظور رسیدن به ساختاری نرم‌تر یعنی فریت توسط دستور عمل موجود در هندبوک آنیل کامل گردیدند. بدین صورت که نمونه‌ها به مدت 1 ساعت در دمای 900 درجه سانتی‌گراد در کوره گرم شدند سپس با نرخ سرد شدن آهسته 110 درجه سانتی‌گراد در هر ساعت تا دمای 700 درجه سانتی‌گراد دمای قطعات پایین آورده شد و قطعات به مدت 1 ساعت در این دما نگهداری شده و پس از آن با نرخ سرد شدن سریع‌تر 55 درجه سانتی‌گراد در هر ساعت تا دمای 340 درجه سانتی‌گراد دمای قطعات کاهش داده شد و در نهایت سرد کردن قطعات در کوره انجام شد.

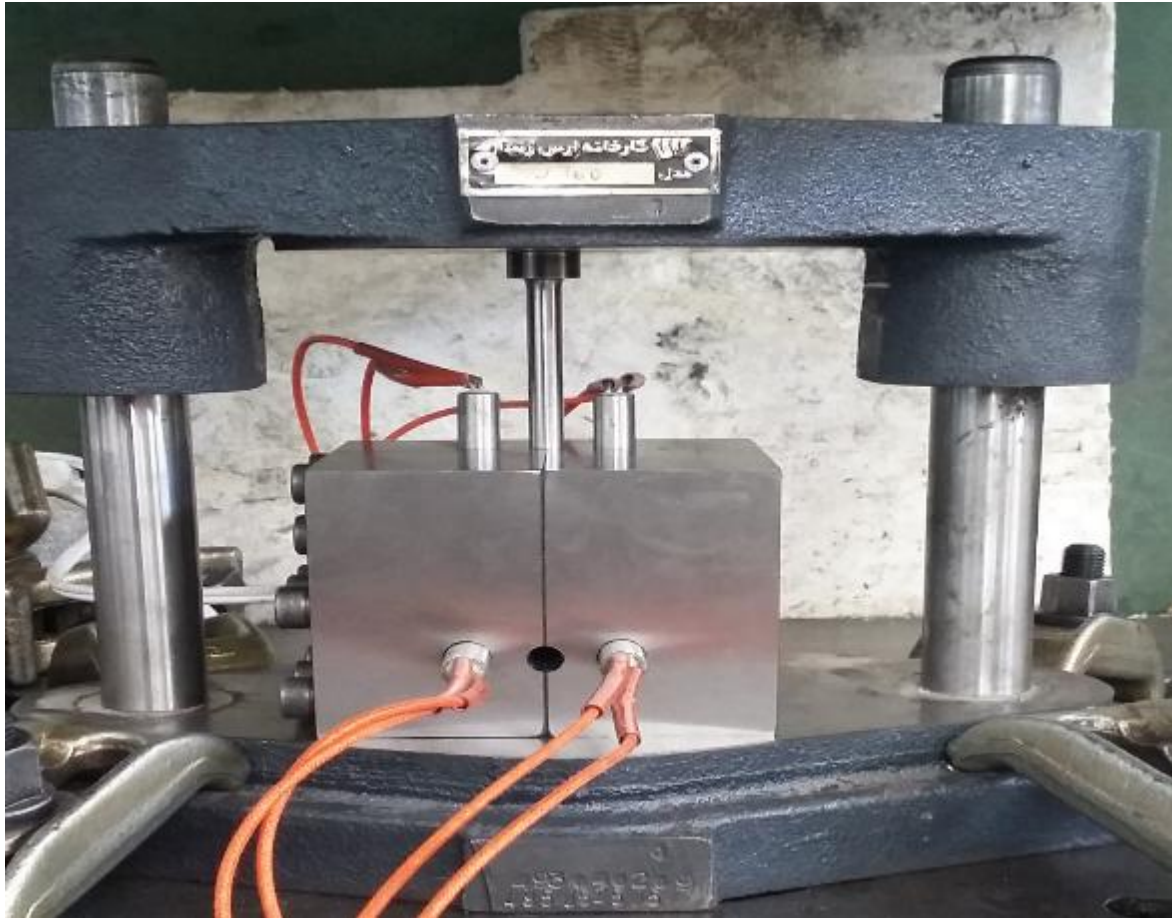
## 2-2 فرایند ECAP

در فرایند پرس کاری در کانال‌های هم مقطع زاویه‌دار ابتدا با استفاده از چهار المنت دما به  $550^{\circ}\text{C}$  رسید سپس با استفاده از یک پرس هیدرولیک با ظرفیت اسمی 60 تن و با سرعت رم 9 میلی‌متر بر ثانیه انجام شد. برای انجام فرایند پرس کاری از قالبی با سطح مقطع دایره‌ای با قطر کانال 10 میلی‌متر

و با زاویه‌ی کانال 90 درجه و شعاع گوشه  $2/5$  درجه استفاده شد. شکل‌های 2 و 3 نمایی شماتیک از درون قالب فرایند ایکپ مورداستفاده و همچنین پیکربندی فرایند شکل‌دهی را نشان می‌دهند.



شکل 2: نمایی واقعی از درون قالب ایکپ مورداستفاده.



شکل 3: تصویری از پیکربندی فرایند شکل‌دهی.

جهت کاهش نیروی اصطکاک بین نمونه و دیواره‌ی قالب از روان کار بانام تجاری مولیکوت<sup>4</sup> استفاده شد. نمونه با سطح مقطع دایره‌ای توسط یک گذر تحت شکل‌دهی به روش ایکپ قرار گرفت. شکل 5 بیلت با مقطع دایره‌ای را بعد از اعمال یک گذر فرایند ایکپ نشان می‌دهد.

<sup>4</sup> MOLYKOTE





شکل 4: تصویری از نمونه ایکپ شده

### 2-3 آزمایش‌های تجربی

جهت مشاهدات میکرو ساختاری بیلت های ایکپ شده از میانه‌ی نمونه و عمود برجهت اکستروژن به وسیله وایرکات برش داده شد و سطح مقطع نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفت. ماده اولیه و سطح مقطع نمونه ایکپ شده پس از مانت سرد با استفاده از سنباده‌های 100، 400، 600، 800 و 1200 و در نهایت با پولیش اتوماتیک با ذرات پودر الماس تا کیفیت سطح شبه آینه آماده‌سازی شد. برای مشاهدات میکرو ساختاری توسط میکروسکوپ نوری، نمونه ایکپ شده به مدت 30 ثانیه در محلول نایتال 3% قرار داده شد و بلافاصله با الکل شسته شد و با گرمای مستقیم خشک شد و در نهایت از میکرو ساختار آن برای تعیین اندازه‌ی متوسط دانه‌ها و تغییرات ساختاری با استفاده از میکروسکوپ نوری با بزرگنمایی 50، 100 و 200 برابر عکس گرفته شد. اندازه‌ی دانه با استفاده از روش جدایش خطی و تحت استاندارد ASTM E112-96 در نرم‌افزار تحلیل عکس MIP به دست آمد.

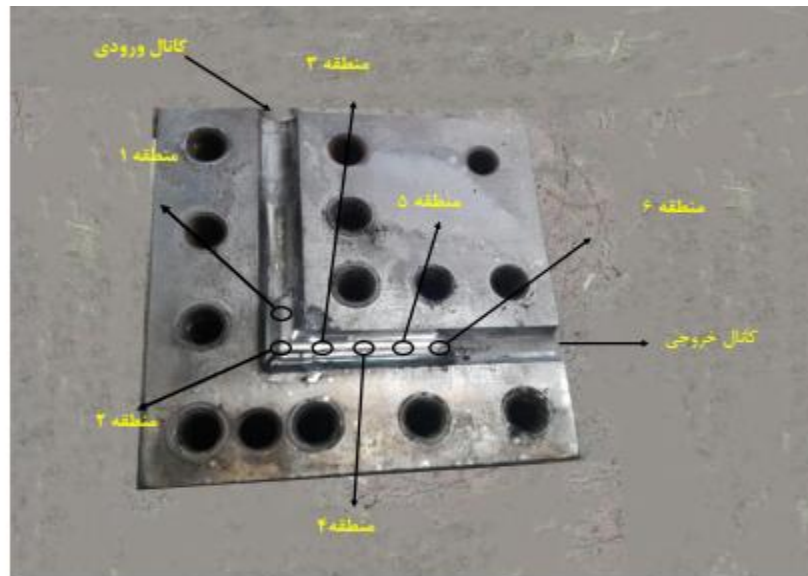
### 3- نتایج و بحث

#### 3-1 بررسی میکرو ساختار

پس از آماده‌سازی نمونه‌ها توسط برش با وایرکات، مانت سرد، سنباده‌زنی، پولیش و اچ کردن در محلول سه درصد نایتال برای دریافت اطلاعات لازم از نحوه عمل گرافیت در طول فرایند ایکپ و شناسایی دیگر فازها تحت عکس‌برداری با میکروسکوپ نوری قرار گرفتند.

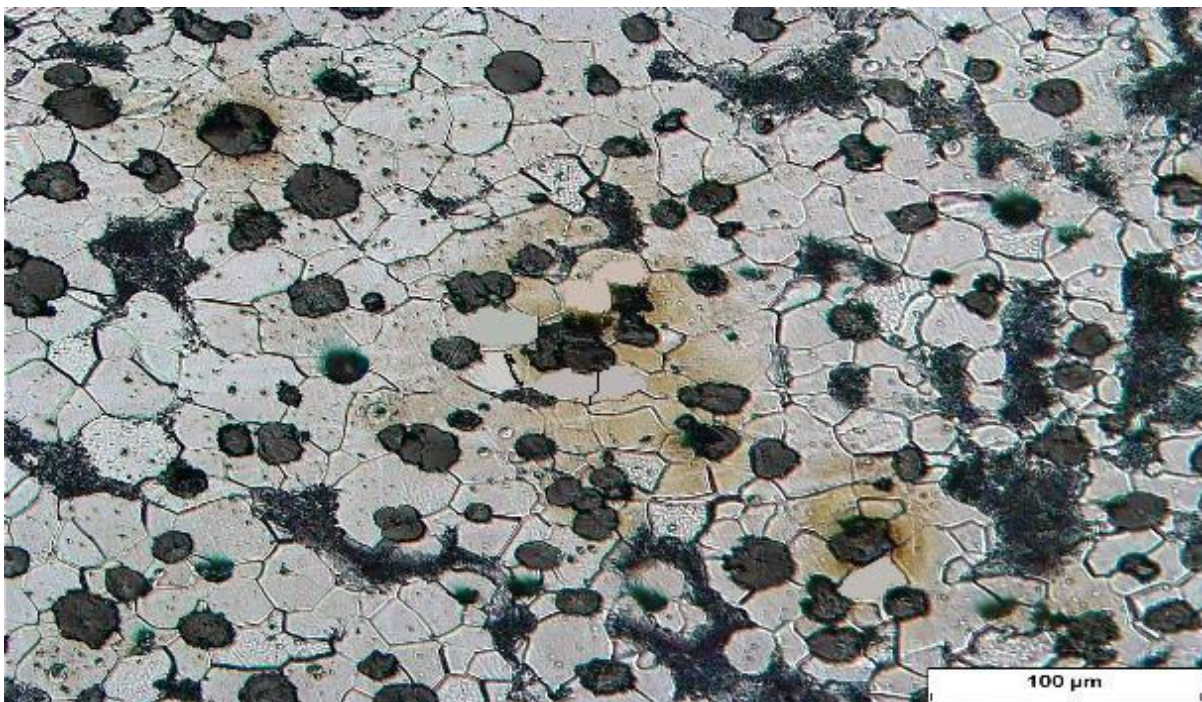
نتایج بیانگر این است که در نمونه ریخته شده گرافیت‌های کروی با توزیع وسیع در ساختار وجود دارد و با انجام فرایند ایکپ گرافیت‌های کروی از حالت کروی خارج شده تا در نهایت به شکل گرافیت لایه‌ای می‌رسیم که مشابه گرافیت‌ها در چدن خاکستری است.

با توجه به شکل 5 که قالب به همراه نمونه ایکپ شده آورده شده است دارای قسمت‌های مختلفی است که منطقه 1 مربوط به قسمتی که بدون تغییر شکل است و تغییرات در ساختار و گرافیت‌ها دیده نشده است منطقه 2 مرز بین قسمت تغییر شکل داده شده و بدون تغییر شکل و تغییر ساختار را نشان می‌دهد و مناطق 3، 4 و 5 دارای بیشترین تغییرات می‌باشند و منطقه 6 اولین مکانی است که حین فرایند ایکپ تغییر شکل داده است.

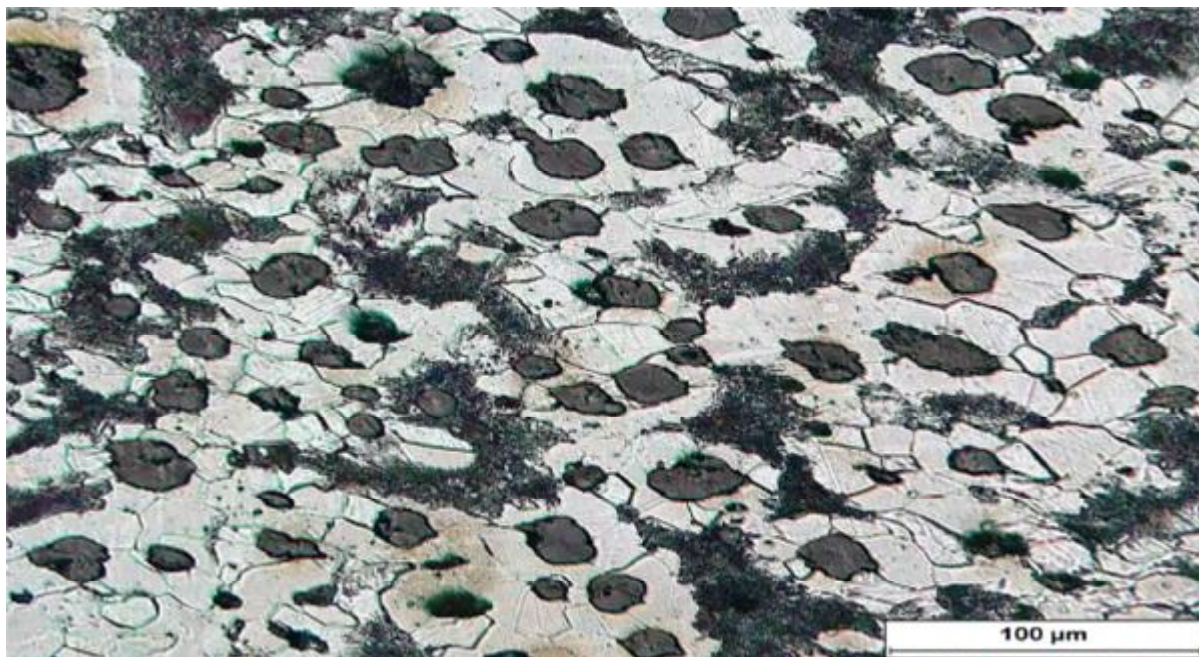


شکل 5: نمایی شماتیک از نمونه ای که شده به همراه قالب.

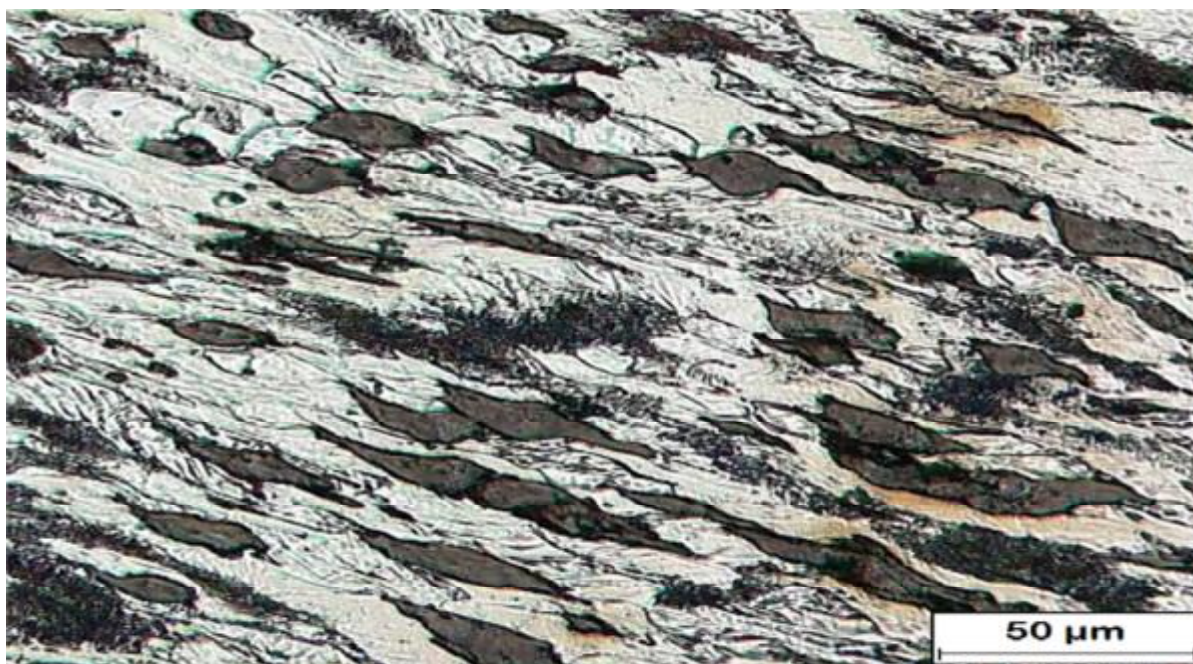
در شکل‌های 6-11 نتایج و عکس‌های میکروسکوپی نوری به صورت اچ شده برای مناطق ذکر شده در شکل 5 آورده شده است.



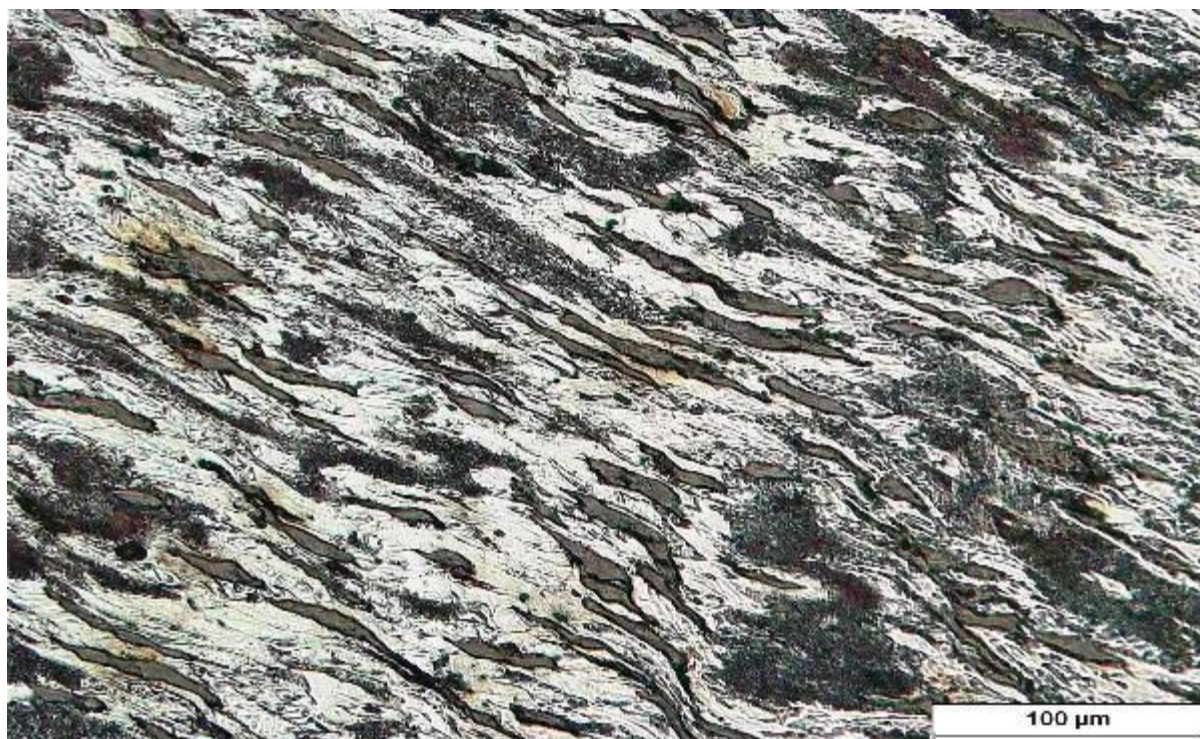
شکل 6: تصویر میکروسکوپ نوری نمونه اچ شده از قسمت بدون تغییر شکل.



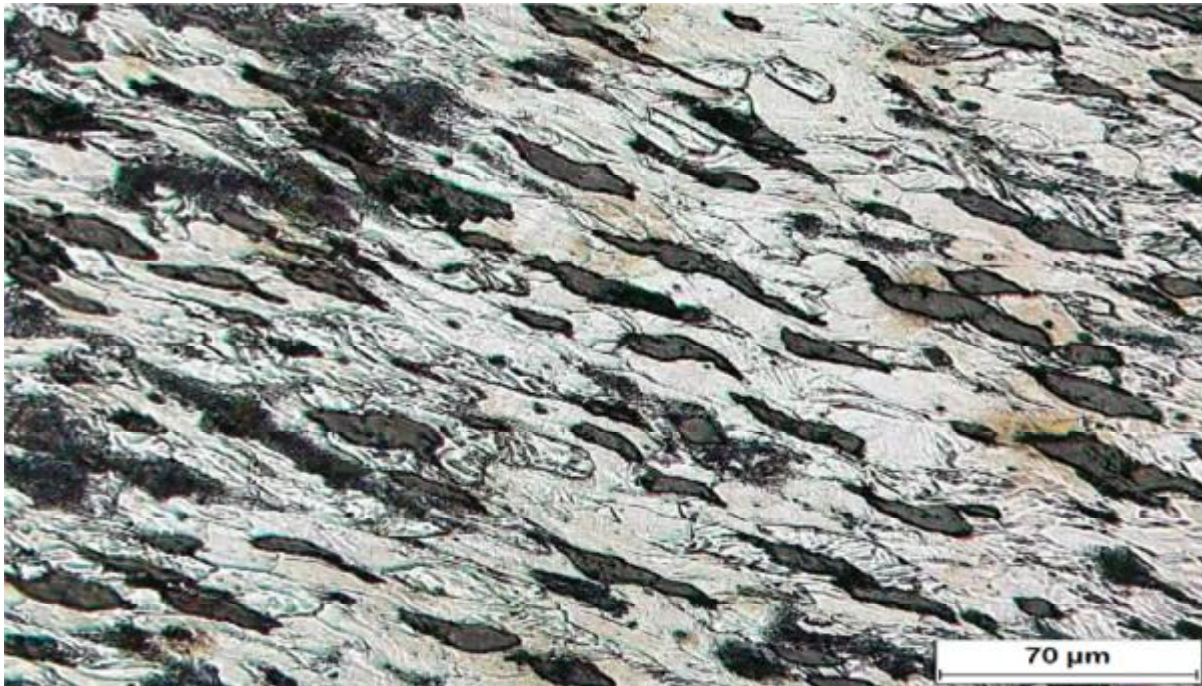
شکل 7: تصویر میکروسکوپ نوری از مرز بین منطقه بدون تغییر شکل و تغییر شکل اولیه.



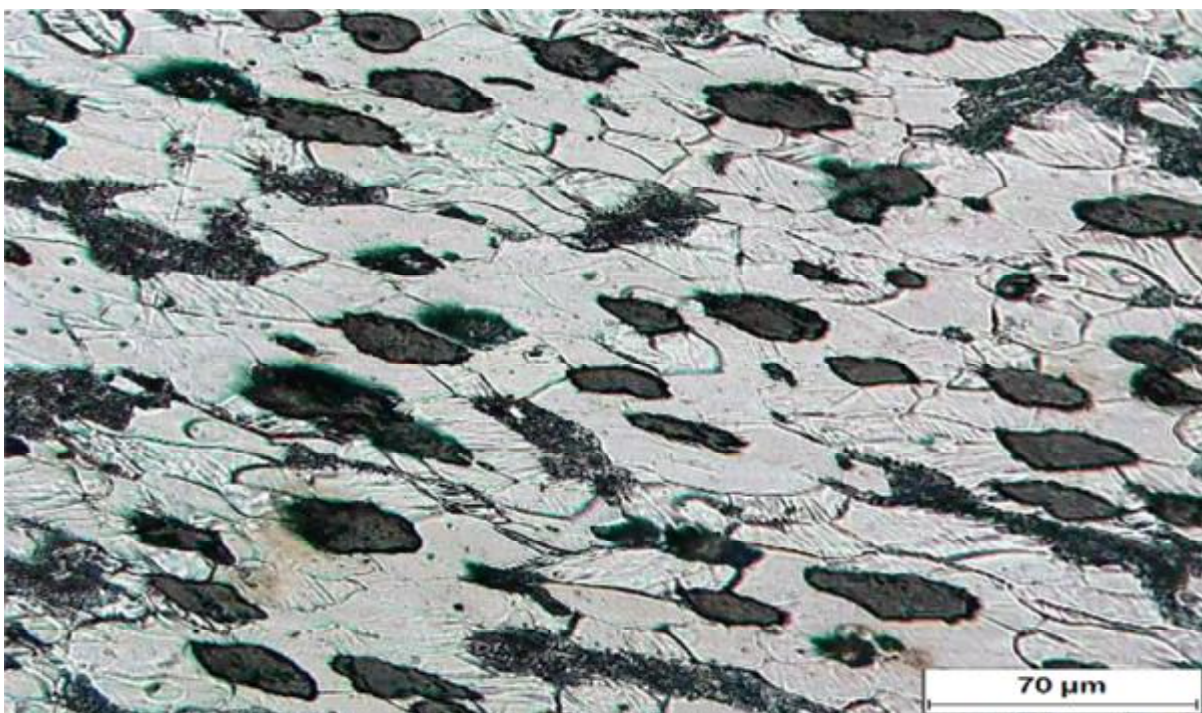
شکل 8 : تصویر میکروسکوپ نوری مربوط به منطقه 3 در شکل 5.



شکل 9 : تصویر میکروسکوپ نوری منطقه 4 در شکل 5.



شکل 10: تصویر میکروسکوپ نوری منطقه 5 در شکل 5.



شکل 11: تصویر میکروسکوپ نوری از اولین منطقه تغییر شکل داده.

شکل 6 بیانگر این است که گرافیت‌ها در حالتی که هیچ تغییر شکلی در نمونه صورت نگرفته است به صورت کاملاً کروی هستند و درزمینه فلز به طور وسیع پخش شده‌اند و میانگین اندازه دانه با توجه به جدول 3 ارائه شده است.

جدول 3: نتیجه به دست آمده با نرم افزار MIP برای اندازه دانه چدن نشکن

واحد	مقدار تقریبی	نماد	توضیحات
1/mm <sup>2</sup>	835/462	Na	تعداد دانه‌ها در mm <sup>2</sup>
μm	1201/478	AM	میانگین مساحت دانه
μm	34/646	DM	میانگین قطر دانه
G	6/75	G	عدد اندازه دانه ASTM

با توجه به شکل 6 می‌توان دریافت که در ابتدا که فرایند ایکپ صورت نگرفته دانه‌بندی درزمینه فلز کاملاً مشخص است و اندازه‌ای در حد میکرومتر دارند ولی با شروع فرایند ایکپ که یکی از مزایای آن ریز کردن دانه‌ها در حد نانومتر است دانه‌ها به طور کامل کشیده شده‌اند و ریز شده‌اند به طوری که نمی‌توان آن‌ها را مشاهده کرد ولی باز در تصویر 11 می‌بینیم که چون تغییر شکل زیادی نداشته‌ایم دانه‌بندی در زمینه نمایان شده است.

همان‌طور که در شکل 7 مشاهده می‌شود، با شروع تغییر شکل که می‌توان مرز بین ناحیه تغییر شکل و بدون تغییر شکل را مشخص کرد گرافیت‌های کروی به حالت نعلبکی شکل درآمده‌اند و سپس با پیشرفت فرایند در جهت عمود بر پرس گسترده گردیدند و این باعث نزدیک‌تر شدن گرافیت‌ها به هم گردید. دلیل این قضیه تغییر شکل و دفرمه شدن گرافیت و زمینه فلزی و همچنین شکسته شدن و سیلان انفرادی شاخه‌های حاصله از گرافیت با زمینه فلزی هست و هر چه پیش می‌رویم مطابق با



شکل‌های کره‌های گرافیت از حالت کروی کاملاً به حالت لایه‌ای درمی‌آیند و در نهایت با توجه به تصاویر میکروسکوپی مشاهده شد که در منطقه 5 و 6 مقدار لایه‌ای شدن فاز گرافیت کاهش یافته است که دلیل آن نبود مانع در برابر نمونه است و نمونه به‌نوعی هنگام عبور از کانال با زاویه 90 درجه سر می‌خورد و خیلی دست‌خوش تغییر ساختاری نمی‌شود که کاملاً در تصاویر مشهود است.

حال پارامتری تحت عنوان بتا را برای تعیین کرویت شکل گرافیت اندازه‌گیری می‌کنیم. در اکثر پژوهش‌ها بر روی چدن‌های نشکن این پارامتر نمایان گر موفقیت یا عدم موفقیت در رسیدن به گرافیت کروی است. پارامتر بتا حاصل تقسیم بزرگ‌ترین طول بر کوچک‌ترین طول از مرکز گرافیت است. این پارامتر با اندازه‌گیری 2 طول برای گرافیت در تصاویری که با میکروسکوپ نوری و با بزرگنمایی 200 گرفته شد، توسط نرم‌افزار MIP محاسبه گردید.

$$\beta = D_2/D_1 \quad (\text{رابطه 2})$$

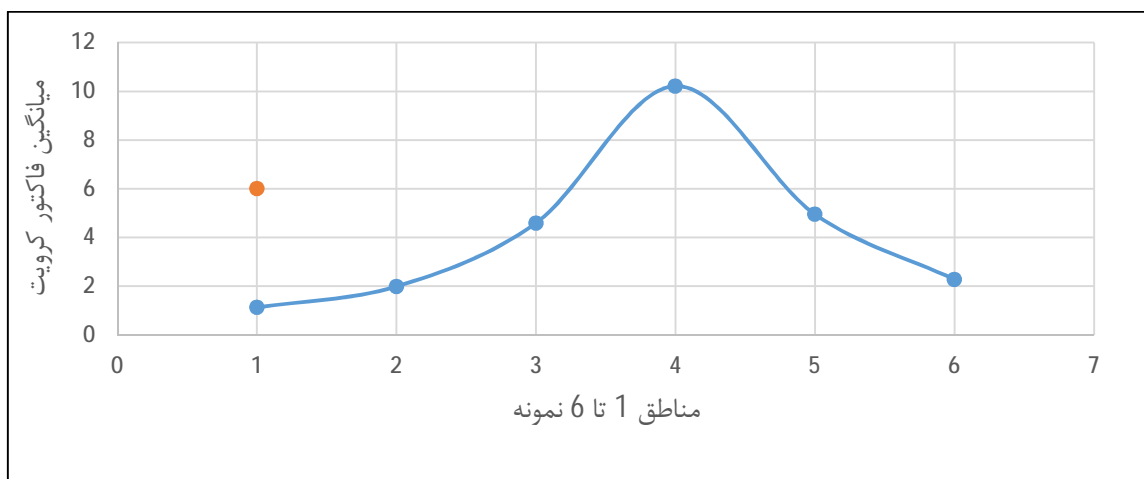
که با توجه به رابطه 2،  $D_2$  بزرگ‌ترین طول گرافیت و  $D_1$  کوچک‌ترین طول از مرکز گرافیت است. حال برای هر تصویر که از نواحی مختلف نمونه تهیه شده است، مقدار  $\beta$  از میانگین 5 تا اندازه‌گیری به دست آمد که با توجه به جدول زیر گزارش شده است

جدول 4: فاکتور کرویت شکل گرافیت (تا سه رقم اعشار)

مناطق	1	2	3	4	5	6
$\beta$ اول	1/083	1/890	5/544	12/363	5/156	1/867
$\beta$ دوم	1/028	2/708	3/670	9/615	4/720	2/844
$\beta$ سوم	1/200	1/500	4/970	8/795	6/132	2/131
$\beta$ چهارم	1/273	1/690	4/071	7/636	4/434	2/081
$\beta$ پنجم	1/060	2/172	4/718	12/641	4/342	2/471



2/278	4/956	10/216	4/594	1/992	1/128	$\beta$ میانگین
-------	-------	--------	-------	-------	-------	-----------------



شکل 12: نمودار فاکتور کرویت گرافیت در مناطق مختلف تغییر شکل طبق شکل 5.

جدول 4 و نمودار شکل 12 ثابت می‌کنند که هرچه به اواسط نمونه تغییر شکل داده می‌رسیم به دلیل وجود مانع بیشتر در برابر نمونه و به تبع آن فشار پرس زیاد تغییر ریزساختاری بیشتری وجود دارد و گرافیت از حالت کروی خارج شده و به حالت کاملاً لایه‌ای درآمده است.

#### 4- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر نمونه چدنی با گرافیت‌های کروی در درون غلاف فولادی قرار گرفت که به روش ایکپ، تغییر شکل شدید را تجربه کرد که با توجه به نتایج به دست آمده به مهم‌ترین آن‌ها در ذیل اشاره می‌شود.



- 1- با انجام فرایند پرس کاری در کانال‌های هم مقطع زاویه‌دار و با توجه به نتایج حاصل از تغییر شکل یافتن گرافیت و کسب موفقیت در حفظ شکل ظاهری قطعه در حالت ماکروسکوپی، می‌توان به درجات بالایی از کارپذیری قطعات چدن نشکن بدون ایجاد ترک در قطعات دست‌یافت.
- 2- با انجام فرایند ایکپ و انجام تغییر شکل بیشتر، گرافیت در نمونه‌ها از حالت کروی خارج شده و در زمینه گسترده می‌گردد و به سمت ساختاری کاملاً لایه‌ای پیش می‌رود.
- 3- چدن نشکن که در ابتدا اندازه دانه‌ای در حد میکرومتر دارد در اثر تغییر شکل، دانه‌ها در جهت عمود بر جهت اعمال نیرو کشیده شدند و ریز شدگی در آن‌ها صورت گرفت.

## منابع

- [1] Morrog H and Williams W J, Journal Of Iron Steel Inst Of London, 158, 306, 1948
- [2] E. O. Hall, The deformation and aging of mild steel, proceedings of the physical Society, Vol. B64, pp. 747-753, 1951.
- [3] N. J. Petch, The cleavage strength of polycrystals, Journal of Iron and steel Research, International, Vol. 174, pp. 25-28, 1953.
- [4] R. Z. Valiev, T. G. Langdon, Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement, Progress in Materials Science, Vol. 51, pp. 881-981, 2006.
- [5] F. Djavanroodi, M. Ebrahimi, Effect of die channel angle, friction and back pressure in the equal channel angular pressing using 3D finite element simulation, Materials Science and Engineering A, Vol. 527, pp. 1230-1235, 2010.
- [6] V. Nagasekhar, T. Rajkumar, D. Stephan, Y. Tick-Hon, R.K. Guduru, Microstructure and mechanical properties of pure gold processed by equal channel angular pressing, Materials Science and Engineering A, Vol. 524, pp. 204-207, 2009
- [7] Xu, T. G. Langdon, Influence of a round corner die on flow homogeneity in ECA pressing, Scripta Materialia, Vol. 48, pp. 1-4, 2003.
- [8] Xu, T. G. Langdon, The development of hardness homogeneity in aluminum and an aluminum and an aluminum alloy processed by ECAP, Journal of Material Science, Vol. 42, pp. 1542-1550, 2007.



- [9] K. Nakashima, Z. Horita, M. Nemoto, T. G. Langdon, Development of a multi-pass facility for equal channel angular pressing to high total strains, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 281, pp. 82-87, 2000.
- [10] Y. Iwahash, J. Wang, Z. Horita, M. Nemoto, T.G. Langdon, Principle of equal channel angular pressing for the processing of ultra-fine grained materials, *Scripta Materialia*, Vol. 35, pp. 143-146, 1996.
- [11] L. A. Neumeier, "Experiments in hot-rolling and forging of ductile cast iron", 1th ed, Washington, D.C., University of Michigan Library, 1980
- [12] Ghahremaninezhad, K. Ravi-Chandar, "Deformation and failure in nodular cast iron", *Acta Materialia*, 60 , 2359–2368, 2012
- [13] Xin Zhao , Xiaoling YANG, "Effect of Hot Compression on Mechanical Properties of Gray Iron", *Advanced Materials Research*, 225-226, 1080-1083, 2011
- [14] V. N. Dubinskii, I. O. Leushin, V. A. Korovin, V. V. Galkin, A. N. Grachev, and V. A. Pryanichnikov, "Hot Deformation of Cast Iron with Globular Graphite", 37,11-13, 2007
- [15] N. P. Lyakishev and G. V. Shcherbedinskii, "Hot Plastic Deformation Of High-Strength Cast Iron", *Metal Science and Heat Treatment*, 43, 11-12, 2001
- [16] Sebastian Balos, Leposava Sidjanin, "Microdeformation of soft particles in metal matrix composites", *Journal of materials processing technology*, 209, 482–487, 2009
- [17] V. N. Dubinskii, I. O. Leushin, V. A. Korovin, V. V. Galkin, A. N. Grachev, and V. A. Pryanichnikov, "Hot Deformation of Cast Iron with Globular Graphite", *Steel in Translation*, 37, 11–13, 2007
- [18] I. Al-Ghonam<sup>1</sup>, M. Ramadan, N. Fathy<sup>3</sup>, K. M. Hafez and A. A. El-Wakil, "Effect of Graphite Nodularity on Mechanical Properties of Ductile Iron for Waterworks Fittings and Accessories", *International Journal of Civil & Environmental Engineering*, 10, 1-5, 2010
- [19] T. S. Lui, C. G. Chao, "High-temperature properties of ferritic spheroidal graphite cast iron", *Journal Of Materials Science*, 24, 2503-2507, 1989
- [20] Isabel Hervas, Mohamed Ben Bettaieb, Anthony Thuault, Eric Hug, "Graphite nodule morphology as an indicator of the local complex strain state in ductile cast iron", *Materials and Design*, 52, 524–532, 2013
- [21] D. R. Askeland And N. Birer, "Secondary Graphite Formation in Tempered Nodular Cast Iron Weldments", *Welding Research Supplement*, 337-342, 1979
- [22] Torsten Shogren, "Influences Of The Graphite Phase On Elastic And Plastic Deformation Behaviour Of Cast Irons", Doctor Of Philosophy, Jonkoping University, Department of Mechanical Engineering, Jönköping, 2007.



دانشگاه شهید چمران اهواز



وزارت صنعت، معدن و تجارت  
سازمان صنعت، معدن و تجارت  
تهران

کنفرانس ملی  
مهندسی مواد، متالورژی و معدن ایران  
۹ اسفند ۱۳۹۶