

# ارزیابی قابلیت شکل پذیری ورق های فولادی کم کربن ST14 در تولید بدنه خودرو

احسان محمدی زهرانی<sup>۱</sup>، مهدی طاهری<sup>۲</sup>، امیر زمرردیان<sup>۳</sup>  
Emohamadi@ma.iut.ac.ir

## چکیده:

در این پژوهش، رفتار شکل پذیری و بافت ورق های فولادی ST14 تولید شده در مجتمع فولاد مبارکه جهت مصارف کشش عمیق مورد ارزیابی قرار گرفت. بافت ورق با استفاده از روش پراش پرتو ایکس (XRD) تعیین شد. به منظور ارزیابی رفتار شکل پذیری ورق، از آزمایش کشش تک محوری و تعیین پارامترهای مربوط به آن و همچنین آزمایش اریکسون و چاپ الگوهای دایره ای روی نمونه ها به منظور رسم منحنی حد شکل پذیری (FLD) استفاده شد. سطح نمودار حد شکل دهی با مقدار نمودار در حالت کرنش صفحه ای ( $FLD_0$ ) مشخص شد. اثر پارامترهای مکانیکی نظیر استحکام تسلیم، استحکام کششی، ضریب کارسختی، پارامتر ناهمسانگردی قائم و نیز بافت ورق بر منحنی حد شکل دهی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش استحکام تسلیم و استحکام کششی سطح زیر منحنی حد شکل دهی کاهش یافت. افزایش درصد ازدیاد طول کل، ضریب کارسختی و پارامتر ناهمسانگردی قائم باعث بهبود قابلیت شکل پذیری ورق شد.

## کلیدواژه:

منحنی حد شکل دهی - بافت - ورق فولادی کم کربن ST14

## *Assessment of Foolad Mobarakeh ST14 low carbon steel sheet for Automobile Frames*

Ehsan Mohamadi<sup>1</sup>; Mehdi Taheri<sup>2</sup>; Amir Zomorodian<sup>3</sup>

1,3- Department of Materials Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan 84154, Iran

2- Department of Materials Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

Emohamadi@ma.iut.ac.ir

## Abstract

In this research formability behavior and texture of St14 low carbon steels produced by Foolad Mobarakeh plant for deep drawing application had been studied. Plate textures were characterized by X-ray Diffraction technique. To evaluate formability behavior one dimensional tensile test was carried out and related parameters were recognized. Moreover Eriksson experiment and spherical pattern printing on samples were also implemented to scheme ultimate formability curve (FLD). Ultimate formability curve area was calculated using plane strain variations ( $FLD_0$ ). Effect of mechanical parameters on ultimate formability curve consist of yield strength, tensile strength, strain hardening coefficient, perpendicular anisotropy and texture were also studied.

The results show that by increasing yield strength and tensile strength, lower area of ultimate formability curve decreases. In contrast by increasing total elongation, strain hardening coefficient and perpendicular anisotropy parameter, plate formability has been enhanced

## Keywords:

Ultimate formability curve, texture, ST14 low carbon steel sheet

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد - دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان

<sup>۲</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد - دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی شریف

<sup>۳</sup> کارشناس ارشد مهندسی مواد - دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان

مولفه‌های دیگر بافت مانند {001} برای کشش عمیق مضر هستند [۶]. در این پژوهش رفتار شکل‌پذیری و بافت ورق‌های فولادی کم کربن تولیدی مجتمع فولاد مبارکه جهت مصارف کشش عمیق و مورد مصرف در صنایع خودروسازی مطالعه شد.

## ۲- مواد و روش تحقیق

به منظور بررسی شکل‌پذیری و بافت ورق‌های فولادی کم کربن آرام شده با آلومینیوم، ۶ سری نمونه تحت شرایط متفاوت تولید در خط نورد سرد مجتمع فولاد مبارکه تهیه شد. ترکیب شیمیایی این نمونه‌ها معادل ترکیب شیمیایی فولاد ST14 در استاندارد DIN آلمان و فولاد SPCE در استاندارد JIS ژاپن بود. برای تعیین پارامترهای مکانیکی آزمایش کشش تک محوری با دستگاه کشش Zwick 1485 طبق استاندارد DIN50114 با سرعت فک ۲۰ میلیمتر در دقیقه صورت گرفت و خواصی چون استحکام تسلیم، استحکام کششی، درصد ازدیاد طول کل و ضریب کارسختی اندازه‌گیری شد. پارامتر ناهمسانگردی قائم و صفحه‌ای با تهیه نمونه‌های کششی در زوایای ۰، ۴۵ و ۹۰ درجه نسبت به جهت نورد بر طبق روابط (۱) و (۲) به دست آمد.

$$\bar{R} = \frac{R_{0^\circ} + 2R_{45^\circ} + R_{90^\circ}}{4} \quad (1)$$

$$\Delta R = \frac{1}{2} (R_{0^\circ} - 2R_{45^\circ} + R_{90^\circ}) \quad (2)$$

به منظور ارزیابی شکل‌پذیری ورق‌های فولادی، منحنی‌های حد شکل‌پذیری به صورت غیر مسطح و به کمک آزمایش اریکسن به روش هکر رسم گردید [۷]. سطح ورق توسط دوایر متحدالشکل با استفاده از الگوی دایره‌ای با قطر دوایر ۲/۵۴ میلی‌متر (۰/۱ اینچ) شبکه‌بندی شد. حکاکی شبکه دایره‌ای بر روی سطح ورق به منظور اعمال دوایری با چسبندگی بهتر توسط روش حکاکی الکتروشیمیایی صورت گرفت. ضمن کار با دستگاه حکاکی الکتروشیمیایی ممکن بود به دلیل محبوس شدن گازهای حاصل از تجزیه الکتروشیمیایی محلول مارکر، اتصال الکتریکی در برخی مناطق به صورت موضعی قطع شود و دوایر حک نشوند لذا در هنگام کار اعمال فشار مناسب به غلطک جهت خروج گازهای احتمالی ضروری است. در ضمن عملیات حکاکی از جریان متناوب به جای جریان مستقیم استفاده شد. با استفاده از جریان متناوب اعمال دوایر به روش نشانند دوایر روی سطح صورت می‌گیرد و رنگ دوایر کاملاً متفاوت از زمینه و به خوبی قابل رویت است. در جریان مستقیم اعمال دوایر به روش برداشتن دوایر از روی سطح بوده و هم رنگ زمینه است. ولتاژ اعمال شده توسط دستگاه حکاکی الکتروشیمیایی در بیشترین مقدار خود (۱۸-۱۷ ولت) قرار داشت.

## ۱- مقدمه

ورق‌های فولادی به علت استحکام بالا، جوش‌پذیری مطلوب و شکل‌پذیری خوب در صنایع مختلف به‌ویژه در صنایع خودروسازی جهت مصارف کشش عمیق کاربرد زیادی یافته‌اند. جهت استفاده از ورق‌های فولادی در مصارف کشش عمیق و عملیات شکل‌دهی لازم است که قابلیت شکل‌پذیری و مناسب بودن آنها جهت شکل‌دهی توسط آزمون‌های شکل‌پذیری مورد تایید قرار گیرد. شکل‌پذیری ورق به نوع فولاد، طراحی قطعه، ابزار کار، شرایط سطحی ورق، نوع روانساز و بافت ایجاد شده در ورق بستگی دارد [۱]. مشخص کردن مقدار حداکثر کرنش‌های اصلی در روش‌های مختلف شکل‌دهی یکی از اصولی‌ترین روش‌ها برای تعیین قابلیت شکل‌پذیری ورق‌های فلزی می‌باشد. دیاگرام‌های حد شکل‌دهی میزان و نحوه تغییر کرنش‌های بحرانی را برای حالت‌های مختلف بارگذاری به صورت یک منحنی پیوسته نشان می‌دهد. هر نقطه در این صفحه اگر زیر منحنی قرار بگیرد قابل قبول و اگر بالای منحنی قرار بگیرد زوج کرنش تشکیل دهنده این نقطه باعث شکست ورق خواهد شد. شکست در این مرحله به منزله شروع حالت گلوبی شدن و نه حتماً به عنوان پارگی می‌باشد. روش‌های تعیین منحنی حد شکل‌دهی به دو گروه اتساع درون صفحه و اتساع خارج از صفحه تقسیم شدند. در حالت اتساع درون صفحه، تغییر فرم ورق با استفاده از یک پانچ ته صاف در یک صفحه و در حالت اتساع خارج از صفحه تغییر فرم ورق با استفاده از یک پانچ کروی انجام می‌شود. در حالت اتساع غیر مسطح برخلاف روش دیگر، اصطکاک و هندسه ابزار اهمیت دارد [۲]. استفاده از منحنی‌های حد شکل‌دهی قبلاً توسط کیلر و گودوین اشاره شده است [۳ و ۴]. این دو محقق منحنی‌های حد شکل‌دهی را برای فولادهای کم کربن به دست آوردند. منحنی‌های اخیر به نام کیلر-گودوین خوانده شدند. به منظور به دست آوردن ارتباط بین خواص کششی ورق با سطح زیر منحنی حد شکل‌دهی لازم بود که منحنی حد شکل‌دهی در سرتاسر رنج تنش‌های دو محوری تعیین گردد. بدین منظور کیلر برای به دست آوردن حالات تنش به ازای مقادیر مثبت کرنش از سمبیهایی با هندسه متفاوت استفاده کرد. ناکازیم و همکارانش هم با استفاده از سنبه نیم کروی روشهایی را توسعه دادند [۵]. بافت در ورق‌های فلزی به صورت  $\langle uvw \rangle$  {hkl} نشان داده می‌شود و بدین معنی است که صفحات {hkl} دانه‌های ورق موازی با سطح ورق و جهات  $\langle uvw \rangle$  آن دانه‌ها موازی با جهت نورد قرار گیرد. برای تولید محصولات با خاصیت شکل‌پذیری مناسب، یعنی مقدار  $\bar{R}$  بالا و  $\Delta R$  پایین بافت‌های تشکیل شده در طی آنیل باید دارای مولفه‌های قوی {111} باشند. گزارش شده است که

قابلیت شکل‌پذیری ورق فلزی، بیان کرنش اصلی در کرنش فرعی صفر است. این نقطه در واقع پائین‌ترین نقطه منحنی است و حالت کرنش صفحه‌ای را بیان می‌کند که با  $FLD_0$  بیان شد. مقادیر  $FLD_0$  که عدد مهمی در شکل‌دهی قطعات در حال کار سرد است از منحنی حد شکل‌پذیری برای هر نمونه به دست آمد. عمق فنجان اریکسون (ED) برای نمونه ۱۱۵ میلی‌متر در حالت روانکاری با نسبت کرنش حدود ۱ به دست آمد و در جدول ۳ ذکر شد. در منحنی‌های حد شکل‌پذیری در شکل ۱ مشاهده می‌شود که مقدار  $FLD_0$  برای نمونه‌ها در دامنه کرنش ۳ تا ۵ درصد اتفاق افتاده است در حالی که انتظار می‌رفت این مقدار در حالت کرنش صفحه‌ای اتفاق بیفتد. دلیل این امر خم شدن ورق در هنگام انطباق یافتن با شکل سنبه است. اگر در صفحه میانی ورق شرایط کرنش صفحه‌ای برقرار باشد کرنش در سطح خارجی ورق یعنی جایی که اندازه‌گیری انجام می‌شود کششی خواهد بود. (اگر قطر سنبه در حدود ۱۰ میلی‌متر و ضخامت ورق ۰/۸ میلی‌متر باشد، کرنش خمشی در سطح خارجی برابر با ۰/۰۰۷۵ یا در حدود ۳/۴ درصد خواهد بود) [۹]. در جدول ۳ مشاهده می‌شود که با افزایش ED قابلیت شکل‌پذیری ورق بهبود یافت در اشکال ۲، ۳، ۴، ۵ و ۶ مقادیر  $FLD_0$  برای هر نمونه به عنوان شاخص قابلیت شکل‌پذیری ورق که از منحنی حد شکل‌پذیری به دست آمد، برحسب استحکام تسلیم، استحکام کششی و درصد ازدیاد طول کل، ضریب کارسختی و پارامتر ناهمسانگردی قائم که از آزمون کشش به دست آمده‌اند رسم شد. بر طبق شکل ۲ و شکل ۳ مشاهده شد که با افزایش استحکام تسلیم و استحکام کششی در نمونه‌ها،  $FLD_0$  کاهش یافت. اشکال ۴، ۵ و ۶ نشان‌دهنده افزایش  $FLD_0$  با افزایش درصد ازدیاد طول کل،  $n$  و  $\bar{T}$  است. افزایش  $n$  باعث شد که توزیع کرنش به صورت یکنواخت‌تری انجام شود و شکل‌پذیری ورق افزایش یابد. با افزایش کرنش، تنش جریان بر طبق رابطه هولمن افزایش می‌یابد، در نتیجه ضریب کار سختی ممکن است معیاری برای تعیین حداکثر شکل‌پذیری در مواد مختلف باشد. در فرایند اتساع هر چه ضریب کار سختی بالاتر باشد، کرنش‌های بزرگتری را می‌توان به دست آورد. یک ضریب کار سختی بالاتر به مفهوم افزایش طول یکنواخت بیشتر است، در نتیجه تمایل قطعه برای گلوئی شدن موضعی کاهش می‌یابد [۱۰]. بزرگ بودن مقدار  $\bar{T}$  معرف مقاومت نسبت به نازک شدن در جهت ضخامت یعنی جهت عمود بر صفحه ورق است [۱۱]. بافت ورق‌ها همگی فایبر  $\gamma$  با اصلی‌ترین اجزاء  $\{111\} <110>$  و  $\{111\} <112>$  بود. جزء  $\{111\} <110>$  دارای بیشترین شدت بود. همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌گردد صفحات (222)

برای رسم هر کدام از نمودارهای حد شکل‌دهی تعداد ۹ نمونه از هر ورق در عرض‌های متفاوت و طول ثابت ۰/۲ متر تهیه شد. در جدول ۱ ابعاد نمونه‌ها، همراه با نوع روانکاری و نسبت کرنش ذکر شده است. با افزایش عرض نمونه‌ها، می‌توان تا نسبت کرنشی حدود ۰/۴ را به دست آورد. مقادیر بالاتر نسبت کرنش در نتیجه افزودن روانکار به دست می‌آید. در مورد نمونه عرض کم (۲۵ میلی‌متر) به منظور بالا بردن دقت در رسم منحنی با به کارگیری نمونه کششی نسبت کرنش حدود ۰/۵- به دست آمد. نمونه‌ها تا حد پارگی توسط دستگاه AMSLER BUP 2000 آزمایشگاه محصول مجتمع فولاد مبارکه با سنبه نیم‌کروی به قطر ۶۰ میلی‌متر، تغییر شکل داده شد. سرعت حرکت سنبه ۰/۵ میلی‌متر بر ثانیه، درصد حساسیت ۰/۹ و میزان نیروی ورق‌گیر با تغییر عرض نمونه‌ها به گونه‌ای اعمال شد تا ورق کاملاً مهار شده ولی کاهش ضخامت موضعی در ورق ایجاد نشود. پس از تغییر فرم هر یک از دوایر در ناحیه گلوئی شده به بیضی تبدیل شد. صحیح‌ترین روش در رسم نمودار حد شکل‌دهی در نظر گرفتن بیضی‌های گلوئی شده است. برای اندازه‌گیری کرنش‌های حدی حداکثر و حداقل در هر بیضی قطر بزرگ و کوچک بیضی توسط خط کش میلراندازه‌گیری شد [۸]. برای هر نمونه ۸ بیضی گلوئی شده در مجاورت منطقه پارگی در نظر گرفته شد. کرنش‌های مهندسی حداکثر و حداقل به دست آمده در مورد هر دایره گلوئی شده برای رسم منحنی حد شکل‌پذیری استفاده شد. منحنی درست زیر نقاط مشخص شده روی نمودار رسم گردید. به منظور ارزیابی بافت ورق الگوهای پراش توسط دیفراکتومتر اشعه ایکس مدل Philips Xpert با تابش با  $CuK\alpha$  با اندازه پله ۰/۰۲ درجه و زمان شمارش ۱ ثانیه به دست آمدند. سپس مقدار  $\frac{I_{222}}{I_{200}} + \frac{I_{211}}{I_{110}}$  از الگوی پراش نمونه به دست آمد.

### ۳- نتایج و بحث

در جدول ۲ خواص مکانیکی به دست آمده توسط آزمون کشش ارائه شده است. به منظور تسهیل کار هر یک از نمونه‌ها با یک شناسه معرفی شد که این شناسه در جدول ذکر گردید. مقدار  $\frac{I_{222}}{I_{200}} + \frac{I_{211}}{I_{110}}$  از الگوی پراش نمونه‌های مذکور در جدول ۳ ذکر شد. این کمیت از این لحاظ که صفحات (222) و (211) از ازمحلال صفحات (200) و (110) ناشی می‌شوند، کمیتی مناسب جهت بررسی بافت‌های حاصل از آنیل می‌باشد. در شکل ۱ منحنی‌های حد شکل‌دهی به دست آمده برای هر دسته از نمونه‌ها رسم شد. یک راه مناسب برای شرح دادن موقعیت عمومی دیاگرام حد شکل‌دهی و

- [3] S.P. Keeler, 'Sheet Metal Ind, Vol. 42, P.683', 1965
- [4] A.K. Ghosh and J.V. Laukonis. Proc. 2 nd Int.Conf. Mechanical. Behavior of Materials, Boston, P.125-132, 1976.
- [5] M. Grumbach and G.Sanz., 'Rev. Met.', 1972.
- [6] J.F.Held, in Mechanical Working and Steel Processing, (ed.D.A Edgecombe), New York, American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineering.
- [7] W.Choi, P.P.Gillis, 'Calculation of Forming Limit Diagram', Metallurgical Transformation, vol.20, AP., 1989
- [8] S.Dinda, S.P.Keeler, 'How to Use Circle Grid Analysis for Die Tryout', American Society for Metals, Metal Park, Ohio, 1989

و (211) که صفحات مفیدی برای شکل پذیری هستند از شدت نسبی بالایی نسبت به صفحات (200) و (110) برخوردار هستند. این بافت که در حین آنیل و پس از نورد در ورق ایجاد می شود رابطه مستقیمی با مقادیر  $\bar{r}$  بالا و در نتیجه شکل پذیری مطلوب در ورقها دارد. در شکل ۷ مشاهده شد که با افزایش شدت بافت مقدار  $FLD_0$  افزایش یافت.

#### ۴- نتیجه گیری :

- ۱- با افزایش استحکام تسلیم، استحکام کششی سطح زیر منحنی حد شکل دهی و مقدار  $FLD_0$  کاهش یافت .
- ۲- با افزایش عمق فنجان اریکسون (ED)، درصد ازدیاد طول کل، ضریب کارسختی و پارامتر ناهمسانگردی قائم سطح زیر منحنی حد شکل دهی و  $FLD_0$  افزایش یافت.
- ۳- با افزایش شدت نسبی صفحات (222) و (211) در فرآیند آنیل، سطح زیر منحنی حد شکل دهی افزایش یافت.
- [۹] آقا بابا ج، 'بررسی رفتار شکل پذیری ورقهای فولادی کم کربن'، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۷۵
- [10] K.Matsudo and T.Shimomura, 'Drawability of Low Carbon Steel', Tran. Iron and Steel Inst. Japan, VOL. 10, P.448, 1970
- [11] Lange Kurt, 'Handbook of Metal forming', Mc Graw-Hill, 1985.

#### ۵- منابع و مراجع :

- [1] Sachs, G., 'Sheet Metal Fabricating', New York, Reinhold Publishing Corporation., 1966
- [2] P.L. Charpentier, 'Metall. Trans. A', vol. 6A, pp.1665-69, 1975

#### ۶- جدول ها و شکل ها

جدول (۱): عرض نمونه ها و میزان روانکاری

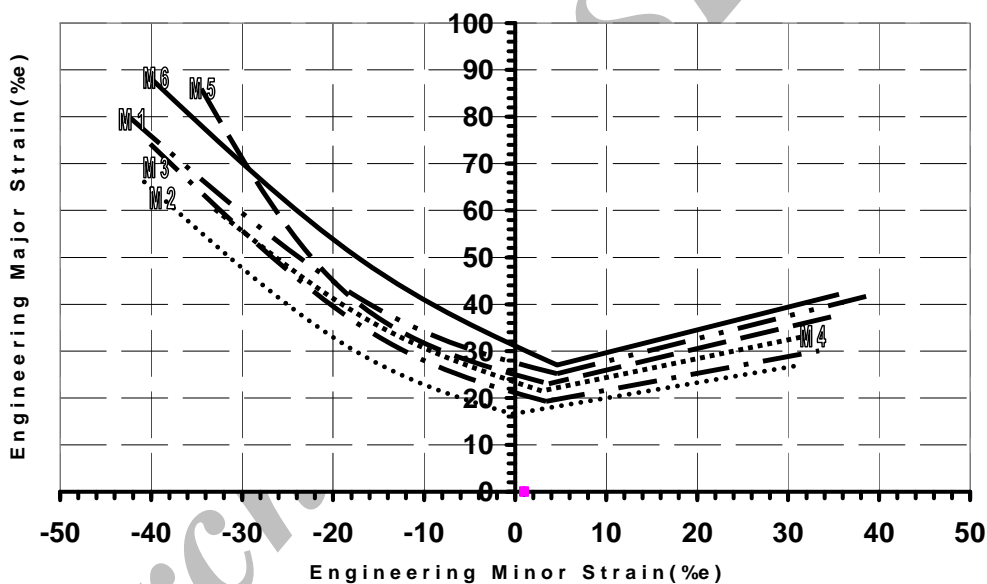
عرض (mm)	25	38	50	63	76	88	115	115
روانکار	خشک	خشک	خشک	خشک	خشک	خشک	خشک	روغن
نسبت کرنش	-(0.3-0.4)	-(0.2-0.3)	-(0.3-0.4)	-(0.15-0.2)	-0.05-0.05	0.05-0.15	0.15-0.4	0.7-0.9

جدول (۲): خواص مکانیکی نمونه ها

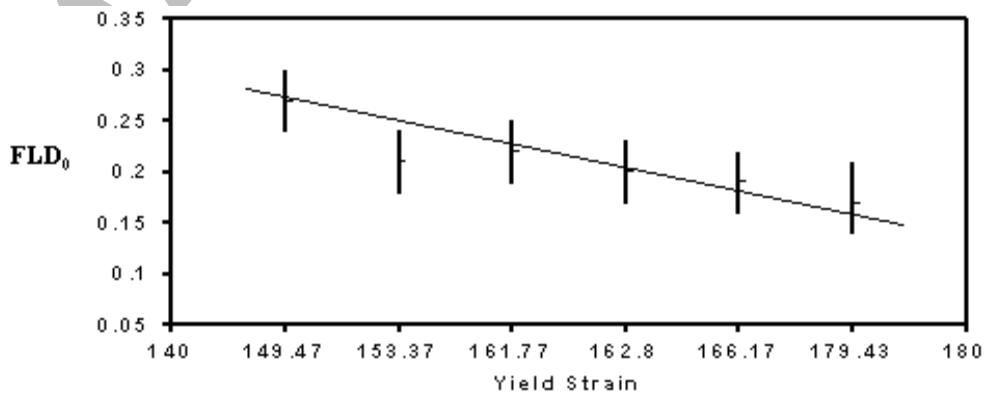
	$\bar{r}$	$\Delta r$	n	Y.S (N/mm <sup>2</sup> )	UTS (N/mm <sup>2</sup> )	%El
$M_1$	1.69	0.43	0.237	149.4	287.3	40.2
$M_2$	1.73	0.47	0.236	162.8	306.1	39.94
$M_3$	1.74	0.50	0.230	153.3	304.9	37
$M_4$	1.75	0.39	0.235	161.7	307.9	37.79
$M_5$	1.8	0.7	0.214	166.1	311.7	39
$M_6$	1.94	0.53	0.234	179.4	319.9	37.9

جدول (۳): خصوصیات بافت ورق‌های فولادی

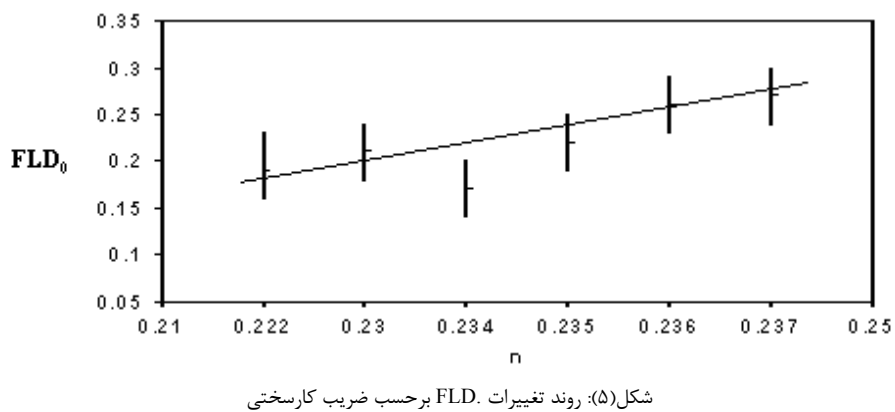
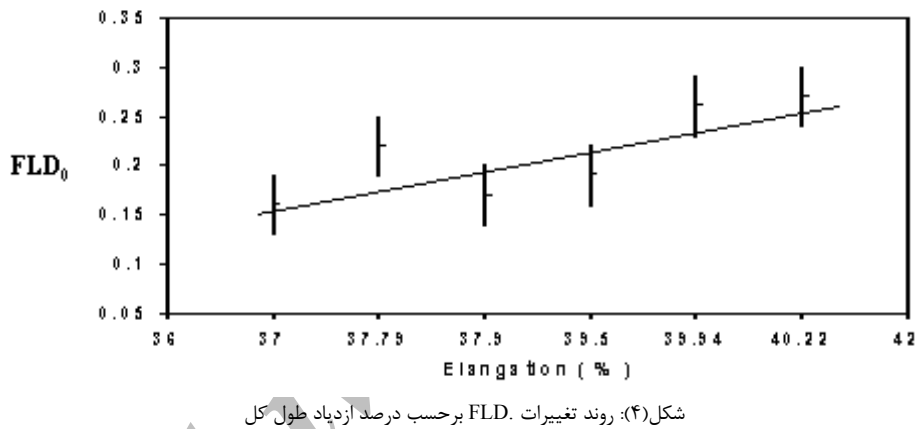
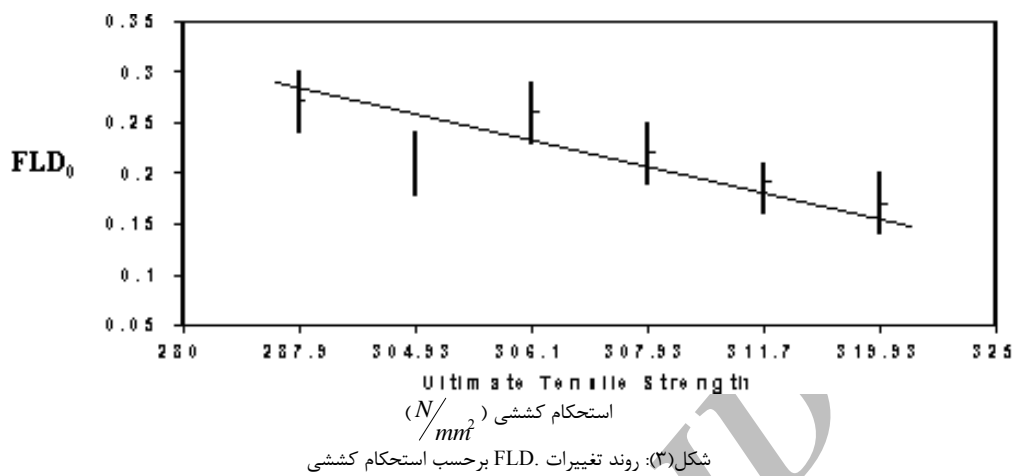
	ED	$FLD_0$	$\frac{I_{222}}{I_{200}}$	$\frac{I_{211}}{I_{110}}$	$\frac{I_{222}}{I_{200}} + \frac{I_{211}}{I_{110}}$
$M_1$	21.85	26	5.57	1.89	7.46
$M_2$	21.34	17	4.13	3.62	7.75
$M_3$	21.17	19	6.15	1.72	7.87
$M_4$	21.29	21	4.95	3.6	8.55
$M_5$	21.51	22	6.24	4.08	10.32
$M_6$	21.88	27	6.03	6.8	12.83

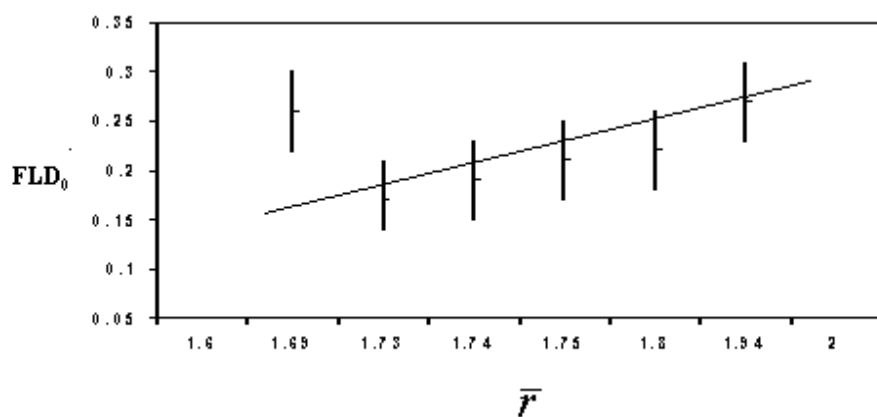


شکل (۱): مقایسه منحنی حد شکل‌پذیری نمونه‌ها

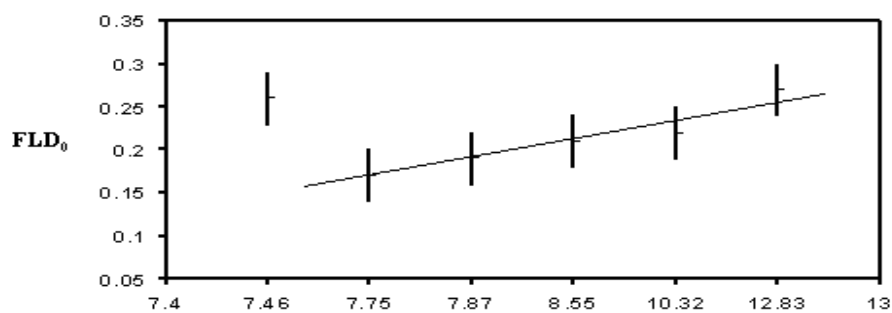


شکل (۲): روند تغییرات  $FLD_0$  بر حسب استحکام تسلیم





شکل (۶): روند تغییرات  $FLD_0$  بر حسب پارامتر ناهمسانگردی قائم



$$\frac{I_{222}}{I_{200}} + \frac{I_{211}}{I_{110}}$$

شکل (۷): روند تغییرات  $FLD_0$  بر حسب شدت نسبی صفحات  $\frac{I_{222} + I_{211}}{I_{200} + I_{110}}$