

ارزیابی قابلیت شکل پذیری ورق‌های فولادی کم‌کربن ST14 در تولید بدنه خودرو

احسان محمدی زهرانی¹، مهدی طاهری²، امیر زمردیان³
Emohamadi@ma.iut.ac.ir

چکیده:

در این پژوهش، رفتار شکل‌پذیری و بافت ورق‌های 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. به‌منظور ارزیابی رفتار شکل‌پذیری ورق، از آزمایش کشش تک محوری و تعیین پارامترهای مربوط به آن و همچنین آزمایش اریکسون و چاپ الگوهای دایره‌ای روی نمونه‌ها به‌منظور رسم منحنی حد شکل‌پذیری (FLD) استفاده شد. سطح نمودار حد شکل دهی با مقدار نمودار در حالت کرنش صفحه‌ای (FLD₀) مشخص شد. اثر پارامترهای مکانیکی نظیر استحکام تسلیم، استحکام کششی، ضریب کارسختی، پارامتر ناهمسانگردی قائم و نیز بافت ورق بر منحنی حد شکل‌دهی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش استحکام تسلیم و استحکام کششی سطح زیر منحنی حد شکل‌دهی کاهش یافت. افزایش درصد ازدیاد طول کل، ضریب کارسختی و پارامتر ناهمسانگردی قائم باعث بهبود قابلیت شکل‌پذیری ورق شد.

کلیدواژه:

منحنی حد شکل‌دهی - بافت - ورق فولادی کم‌کربن ST14

1- دانشجوی کارشناسی ارشد - دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان
2- دانشجوی کارشناسی ارشد - دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی شریف
3- کارشناس ارشد مهندسی مواد - دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان

1- مقدمه

مقدار $\bar{\epsilon}$ بالا و $\Delta \epsilon$ پایین بافت‌های تشکیل شده در طی آنیل باید دارای مولفه‌های قوی {111} باشند. گزارش شده است که مولفه‌های دیگر بافت مانند {001} برای کشش عمیق مضر هستند [6]. 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.

2- مواد و روش تحقیق

به منظور بررسی شکل‌پذیری و بافت ورق‌های فولادی کم کربن آرام شده با آلومینیوم، 6 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 20 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 0، 45 و 90 درجه نسبت به جهت نورد بر طبق روابط (1) و (2) 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 [7]. سطح ورق توسط دوایر متحدالشکل با استفاده از الگوی دایره‌ای با قطر دوایر 2/54 میلی‌متر (0/1 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 نشانندن دوایر روی سطح صورت می‌گیرد و رنگ دوایر کاملاً متفاوت از زمینه و به خوبی قابل رویت است. در جریان

ورق‌های فولادی به علت استحکام بالا، جوش‌پذیری مطلوب و شکل‌پذیری خوب در صنایع مختلف به ویژه 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 [1].

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 گلویی 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 [2].

استفاده از منحنی‌های حد شکل‌دهی قبلاً توسط کیلر و گودوین اشاره شده است [3 و 4]. 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 سمبه‌هایی با هندسه متفاوت استفاده کرد. ناکازینما و همکارانش هم با استفاده از سنبه نیم کروی روشهایی را توسعه دادند [5].

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

بررسی بافت‌های حاصل از آنیل می‌باشد. در شکل (1) 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 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 115 میلی‌متر در حالت روانکاری با نسبت کرنش حدود 1 به دست آمد و در جدول (3) ذکر شد. در منحنی‌های حد شکل‌پذیری در شکل (1) مشاهده می‌شود که مقدار FLD_0 برای نمونه‌ها در دامنه کرنش 3 تا 5 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 اندازه گیری انجام می‌شود کششی خواهد بود. (اگر قطر سنبه در حدود 101 میلی‌متر و ضخامت ورق 0/8 میلی‌متر باشد، کرنش خمشی در سطح خارجی برابر با 0/0075 یا در حدود 3/4 درصد خواهد بود) [9].

در جدول (3) مشاهده می‌شود که با افزایش ED قابلیت شکل‌پذیری ورق بهبود یافت در اشکال 2، 3، 4، 5 و 6 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 2 و شکل 3 مشاهده شد که با افزایش استحکام تسلیم و استحکام کششی در نمونه‌ها، FLD_0 کاهش یافت. اشکال (4)، (5) و (6) نشان‌دهنده افزایش FLD_0 با افزایش درصد ازدیاد طول کل، n ، و $\bar{\sigma}$ است. افزایش n باعث شد که توزیع کرنش به صورت یکنواخت تری 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 [10]. بزرگ بودن مقدار $\bar{\sigma}$ معرف مقاومت نسبت به نازک شدن در جهت ضخامت یعنی جهت عمود بر صفحه

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 (17-18 ولت) قرار داشت. برای رسم هر کدام از نمودارهای حد شکل‌دهی تعداد 9 نمونه از هر ورق در عرض‌های متفاوت و طول ثابت 0/2 متر تهیه شد. در جدول 1 ابعاد نمونه‌ها، همراه با نوع روانکاری و نسبت کرنش ذکر شده است. با افزایش عرض نمونه‌ها، می‌توان تا نسبت کرنشی حدود 0/4 را به دست آورد. مقادیر بالاتر نسبت کرنش در نتیجه افزودن روانکار به دست می‌آید. در مورد نمونه عرض کم (25 میلی‌متر) به منظور بالا بردن دقت در رسم منحنی با به کارگیری نمونه کششی نسبت کرنش حدود 0/5- به دست آمد.

نمونه‌ها تا حد پارگی توسط دستگاه AMSLER BUP 2000 آزمایشگاه محصول مجتمع فولاد مبارکه با سنبه نیم کروی به قطر 60 میلی‌متر، تغییر شکل داده شد. سرعت حرکت سنبه 0/5 میلی‌متر بر ثانیه، درصد حساسیت 0/9 و میزان نیروی ورق گیر 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 گلویی شده به بیضی تبدیل شد. صحیح‌ترین روش در رسم نمودار حد شکل‌دهی در نظر گرفتن بیضی‌های گلویی شده است. برای اندازه‌گیری کرنش‌های حدی حداکثر و حداقل در هر بیضی قطر بزرگ و کوچک بیضی توسط خط کش میلر اندازه‌گیری شد [8]. برای هر نمونه 8 بیضی گلویی شده در مجاورت منطقه پارگی در نظر گرفته شد. کرنش‌های مهندسی حداکثر و حداقل به دست آمده در مورد هر دایره گلویی 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 0/02 درجه و زمان شمارش 1 ثانیه به دست آمدند. سپس مقدار $\frac{I_{222}}{I_{200}} + \frac{I_{211}}{I_{110}}$ از الگوی پراش نمونه به دست آمد.

3- نتایج و بحث

در جدول 2 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 نمونه‌ها ی مذکور در جدول (3) ذکر شد. این کمیت از این لحاظ که صفحات (222) و (211) از ازمحلال صفحات (200) و (110) ناشی می‌شوند، کمیتی مناسب جهت

ورق است [11]. بافت ورقها همگی فایبر γ با اصلی‌ترین اجزاء $\langle 110 \rangle$ و $\langle 111 \rangle$ و $\langle 112 \rangle$ {111} بود. جزء $\langle 110 \rangle$ {111} دارای بیشترین شدت بود. همان طور که در جدول (3) مشاهده می‌گردد صفحات (222) و (211) که صفحات مفیدی برای شکل‌پذیری 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 می‌شود رابطه مستقیمی با مقادیر \bar{T} بالا و در نتیجه شکل‌پذیری مطلوب در ورقها دارد. در شکل 7 مشاهده شد که با افزایش شدت بافت مقدار FLD_0 افزایش یافت.

4- نتیجه گیری :

- 1- با افزایش استحکام تسلیم، استحکام کششی سطح زیر منحنی حد شکل‌دهی و مقدار FLD_0 کاهش یافت .
- 2- با افزایش عمق فنجان اریکسون (ED)، درصد ازدیاد طول کل، ضریب کارسختی و پارامتر ناهمسانگردی قائم سطح زیر منحنی حد شکل‌دهی و FLD_0 افزایش یافت.
- 3- با افزایش شدت نسبی صفحات (222) و (211) در فرآیند آنیل، سطح زیر منحنی حد شکل‌دهی افزایش یافت.

5- 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
- [3] S.P. Keeler, 'Sheet Metal Ind, Vol. 42, P.683', 1965
- [4] A.K. Ghosh and J.V. Laukonis. Proc. 2nd 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
- [9] آقا بابا ج.، بررسی رفتار شکل‌پذیری ورق‌های فولادی کم کربن، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی اصفهان، 1375
- [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.

6- جدول‌ها و شکل‌ها

جدول (1): عرض نمونه‌ها و میزان روانکاری

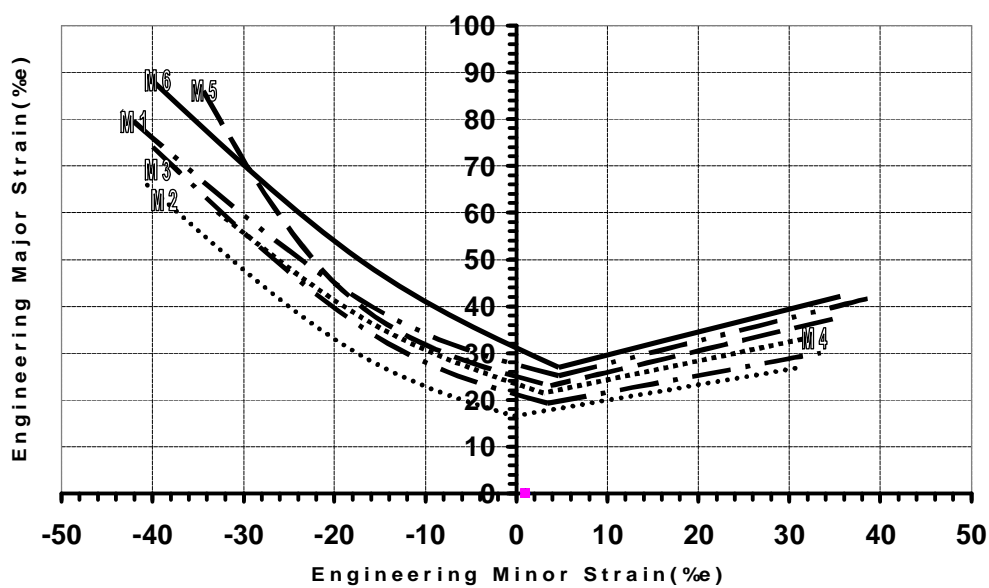
عرض (mm)	25	38	50	63	76	88	115	115
روانکار	خشک	خشک	خشک	خشک	خشک	خشک	خشک	روغن
نسبت کرنش	-(0.3-0.4)	-(0.2-0.3)	-(0.3-0.4)	-(0.15-0.2)	-0.05-0.05	0.05-0.15	0.15-0.4	0.7-0.9

جدول (2): خواص مکانیکی نمونه‌ها

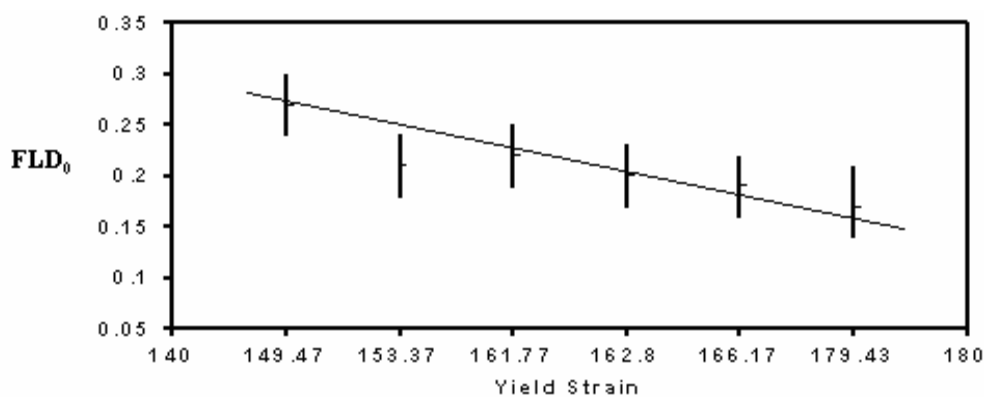
	\bar{r}	Δr	n	Y.S (N/mm ²)	UTS (N/mm ²)	%El
M ₁	1.69	0.43	0.237	149.4	287.3	40.2
M ₂	1.73	0.47	0.236	162.8	306.1	39.94
M ₃	1.74	0.50	0.230	153.3	304.9	37
M ₄	1.75	0.39	0.235	161.7	307.9	37.79
M ₅	1.8	0.7	0.214	166.1	311.7	39
M ₆	1.94	0.53	0.234	179.4	319.9	37.9

جدول (3): خصوصیات بافت ورق‌های فولادی

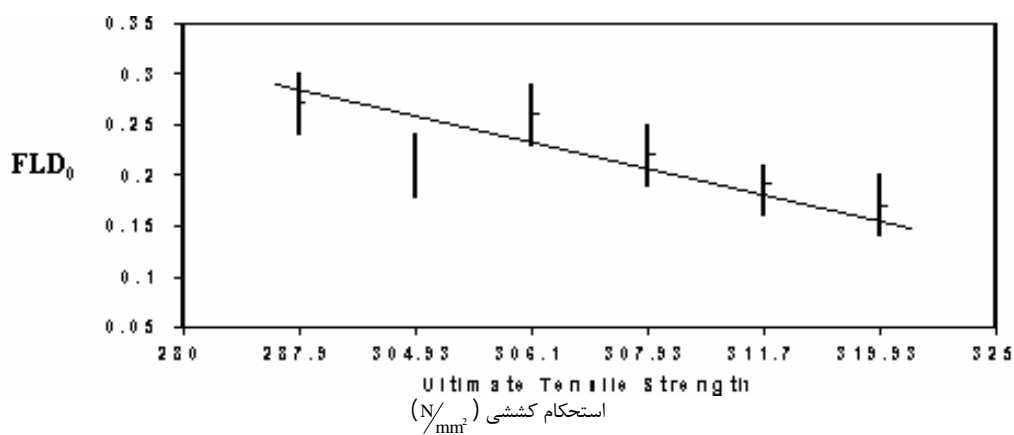
	ED	FLD ₀	$\frac{I_{222}}{I_{200}}$	$\frac{I_{211}}{I_{110}}$	$\frac{I_{222}}{I_{200}} + \frac{I_{211}}{I_{110}}$
M ₁	21.85	26	5.57	1.89	7.46
M ₂	21.34	17	4.13	3.62	7.75
M ₃	21.17	19	6.15	1.72	7.87
M ₄	21.29	21	4.95	3.6	8.55
M ₅	21.51	22	6.24	4.08	10.32
M ₆	21.88	27	6.03	6.8	12.83



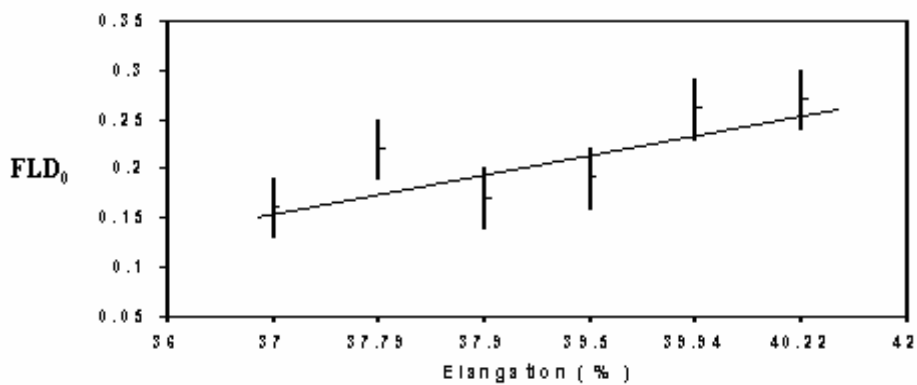
شکل (1): مقایسه منحنی حد شکل پذیری نمونه ها



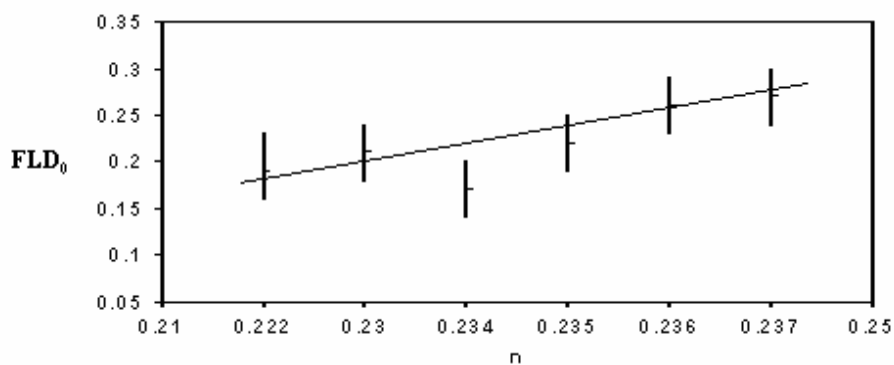
شکل (2): روند تغییرات FLD بر حسب استحکام تسلیم (N/mm^2)



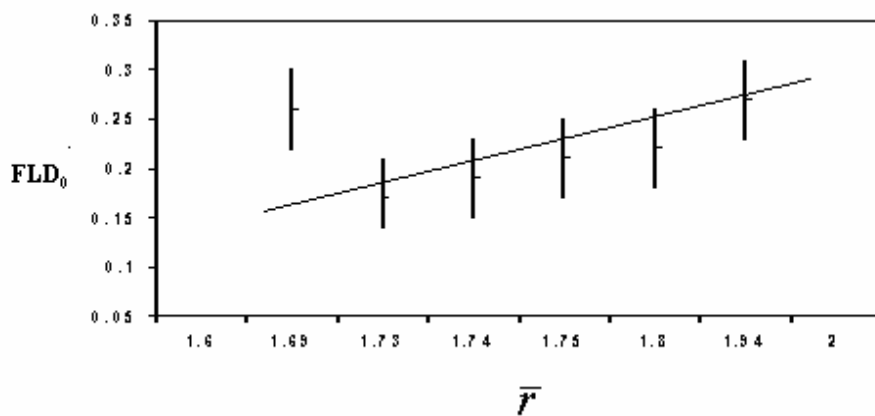
شکل (3): روند تغییرات FLD بر حسب استحکام کششی (N/mm^2)



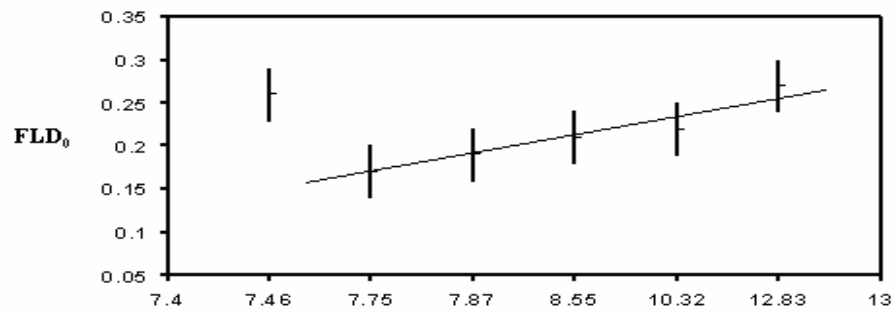
شکل (4): روند تغییرات FLD_0 برحسب درصد ازدیاد طول کل



شکل (5): روند تغییرات FLD_0 برحسب ضریب کارسختی



شکل (6): روند تغییرات FLD_0 بر حسب پارامتر ناهمسانگردی قائم



شکل (7): روند تغییرات FLD_0 بر حسب شدت نسبی صفحات $\frac{I_{202}}{I_{200}} + \frac{I_{211}}{I_{110}}$