



پیش‌بینی رفتار شکست ورق نازک فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ در مقیاس میکرو

مهدی کریمی فیروزجائی^۱، حسن مسلمی نائینی^{۲*}، محمد مهدی کسائی^۴، محمد جواد میرنیا^۵

۱- فارغ‌التحصیل دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۲- استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۳- جهاد دانشگاهی، تهران، ایران

۴- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران

۵- دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

* ایمیل نویسنده مسئول: moslemi@modares.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

مقاله پژوهشی

دریافت: ۲۲ اردیبهشت ۱۴۰۳

پذیرش: ۱۱ تیر ۱۴۰۳

کلیدواژگان:

شکست نرم

معیار آیادا

ورق فولاد زنگ‌نزن

مقیاس میکرو

اثر اندازه در مقیاس میکرو به علت وجود تعداد دانه‌های محدود در ناحیه تغییر شکل اتفاق می‌افتد و رفتار مکانیکی ماده را تحت تأثیر قرار می‌دهد. براین اساس، توصیف رفتار ماده در مقیاس میکرو نیازمند روابط و تئوری‌های جدیدی است. در این مقاله، رفتار شکست ورق نازک فولاد زنگ‌نزن سری ۳۰۴ با انجام آزمون کشش تک‌محوری بر روی نمونه‌های با ضخامت و اندازه دانه متفاوت در مقیاس میکرو مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج نشان داد که کرنش شکست نمونه‌های مختلف در مقیاس میکرو با کم‌شدن ضخامت یا زیادشدن اندازه دانه ورق، کاهش می‌یابد. به‌منظور در نظر گرفتن اثر هم‌زمان ضخامت و اندازه دانه ورق، پارامتر نسبت ابعادی به‌صورت نسبت ضخامت به‌اندازه دانه میانگین ورق تعریف شد. براین اساس، معیار شکست نرم پدیدارشناختی آیادا با در نظر گرفتن اثر اندازه در مقیاس میکرو اصلاح گردید. پیش‌بینی مکان هندسی شکست با استفاده از معیار اصلاح‌شده تطابق خوبی با کرنش شکست نمونه‌های مختلف در مقیاس میکرو دارد و این معیار می‌تواند با بیشینه خطای ۴٫۴ درصد مقدار کرنش شکست نمونه‌های مختلف را پیش‌بینی نماید. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، دریافت شد که می‌توان از معیار شکست پیشنهادی برای پیش‌بینی شکست در فرایندهای مقیاس میکرو استفاده نمود.

Predicting the fracture behavior of 304 stainless steel thin sheet in the micro scale

Mehdi Karimi Firouzjaei¹, Hasan Moslemi Naeini^{2,3*}, Mohammad Mehdi Kasaei⁴, Mohammad Javad Mirnia⁵

1- PhD Graduate, Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

2- Professor, Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

3- Academic Center for Education, Culture and Research (ACECR), Tehran, Iran

4- Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran

5- Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

* Corresponding Author's Email: moslemi@modares.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 11 May 2024

Accepted: 1 July 2024

Keywords:

Ductile Fracture

Ayada Criterion

Stainless Steel Sheet

Micro Scale

Abstract

The size effect in microscale occurs due to the presence of a limited number of grains in deformation area and affects the mechanical behavior of the material. Based on this, describing the material behavior in the micro scale requires new relations and theories. In this article, the fracture behavior of 304 stainless steel thin sheet was tested by performing a uniaxial tensile test on the specimens with different thicknesses and grain sizes in the micro scale. The results showed that the fracture strain of different specimens in the micro scale decreases with decreasing thickness or increasing the grain size of the sheet. In order to consider the interactive effect of sheet thickness and grain size, the aspect ratio parameter was defined as the ratio of thickness to the average grain size of the sheet. Based on this, Ayada phenomenological ductile fracture criterion was modified by considering the size effect in the micro scale. Predicting the fracture locus using the modified criterion is in accordance with the fracture strain of different specimens in the micro scale, and this criterion can predict the fracture strain of different specimens with a maximum error of 4.4%. Based on the obtained results, it was found that the proposed fracture criterion can be used to predict fracture in the micro scale processes.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Karimi Firouzjaei M, Moslemi Naeini H, Kasaei MM, Mirnia MJ. Predicting the fracture behavior of 304 stainless steel thin sheet in the micro scale. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2024 Sep 22;11(7):10-19. doi: 10.22034/ijme.2024.456947.1955 [In Persian]

۱- مقدمه

روند جهانی کوچک‌سازی محصولات موجب کاربرد وسیع محصولات مقیاس میکرو در حوزه‌های گوناگون از جمله الکترونیک، ابزارهای دقیق، تجهیزات پزشکی و هوافضا شده است. پدیده اصلی که رفتار مکانیکی ماده را در فرایندهای میکرو شکل‌دهی تحت تأثیر قرار می‌دهد، اثر اندازه است [۱]. اثر اندازه از دو منبع متفاوت شامل اندازه نمونه و اندازه دانه ناشی می‌شود. در فرایندهای شکل‌دهی ورق، هنگامی که نسبت ضخامت به اندازه دانه میانگین ورق کم‌تر از ده باشد، اثر اندازه به وضوح قابل مشاهده است [۲].

در فرایندهای شکل‌دهی فلزات، عیوب متداولی مانند برگشت فبری [۳، ۴]، شکست [۵، ۶]، چین‌خوردگی [۷، ۸] و خطاهای هندسی [۹، ۱۰] موجب کاهش کارایی فرایند می‌گردد. پدیده شکست نرم، قابلیت اطمینان فرایند و کیفیت محصولات شکل‌دهی شده را تحت تأثیر قرار می‌دهد. نحوه تاثیرگذاری اثر اندازه روی رفتار شکست ماده یک موضوع تحقیقاتی مهم در حوزه میکرو شکل‌دهی است. بر این اساس، توسعه مدل شکست نرم که بتواند رفتار شکست ماده در مقیاس میکرو را با دقت خوب پیش‌بینی نماید، ضروری می‌باشد.

رفتار ماده در مقیاس میکرو از مشخصات ریزساختاری از جمله اندازه دانه تأثیر می‌پذیرد [۱۱]. مطالعات قبلی در زمینه رفتار شکست ماده در مقیاس میکرو بر روی نحوه تأثیر اندازه نمونه و اندازه دانه متمرکز بوده است. معیارهای شکست نرم موجود، دقت خوبی در پیش‌بینی شکست در فرایندهای مختلف شکل‌دهی مقیاس ماکرو دارند؛ این در حالی است که پیش‌بینی شکست با معیارهای متداول در مقیاس میکرو با خطا همراه است. بر این اساس، ارزیابی تأثیر هم‌زمان اندازه نمونه و اندازه دانه بر روی رفتار شکست ماده در مقیاس میکرو می‌تواند به عنوان راه‌حلی برای بهبود دقت معیارها معرفی گردد [۱۲].

فو و چان [۱۳] با انجام آزمون کشش بر روی ورق مس نتیجه گرفتند که کرنش شکست نمونه‌ها با کاهش نسبت ضخامت به اندازه دانه کاهش می‌یابد. نتایج مشابهی در مورد کاهش کرنش شکست در فرایند میکرو خم‌کاری ورق‌های با اندازه دانه درشت گزارش شده است [۱۴]. بررسی اثر اندازه بر روی مکانیزم شکست در مقیاس میکرو نشان داد که کاهش کرنش شکست به علت تغییر رفتار تغییر شکل ماده از حالت چند کریستال به تک کریستال است [۱۵].

کاربرد معیارهای شکست نرم در مقیاس میکرو با در نظر گرفتن اثر اندازه در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است. ژو و همکاران [۱۶] معیار شکست اویان را با معرفی ضریبی که نشان‌گر سهم دانه‌های لایه سطحی ماده است، اصلاح کردند. ران و فو [۱۷] کاربرد معیارهای شکست نرم غیرکوپل در مقیاس میکرو را با استفاده از مدل تنش جریان اصلاح‌شده بررسی کردند. نتایج نشان داد که پیش‌بینی کرنش شکست با و بدون در نظر گرفتن اثر اندازه به ترتیب با خطای ۴ و ۲۰ درصدی همراه است. بای و همکاران [۱۸] اثر اندازه روی شکل‌پذیری ورق فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ را با استفاده از معیارهای شکست نرم مختلف بررسی کردند. نتایج نشان داد که نمودار حد شکل‌دهی روند نزولی با افزایش اندازه دانه در یک ضخامت مشخص دارد. هم‌چنین، معیار شکست اوه^۱ بهترین پیش‌بینی را برای ورق‌های با ضخامت و اندازه دانه مختلف دارد. کریمی و همکاران [۱۹] معیار شکست کوکرافت-لاتهام^۲ را با در نظر گرفتن اثر اندازه در مقیاس میکرو اصلاح کردند. نتایج نشان داد که استفاده از معیار اصلاح‌شده موجب کاهش بیشینه خطای پیش‌بینی از ۲۵,۴ درصد به ۶,۴ درصد می‌گردد.

در این پژوهش، معیار شکست نرم آیادا با در نظر گرفتن اثر اندازه نمونه و اندازه دانه در مقیاس میکرو اصلاح می‌شود. در ادامه، صحت‌سنجی معیار شکست اصلاح‌شده با مقایسه کرنش شکست نمونه‌های با ضخامت و اندازه دانه مختلف در مقیاس میکرو انجام می‌شود. هم‌چنین، ارزیابی دقت معیار شکست اصلاح‌شده با مقایسه پیش‌بینی مدل تحلیلی با نتایج آزمون کشش نمونه‌های جدید صورت می‌گیرد.

۲- آزمایش‌های تجربی

ورق فولاد زنگ‌نزن سری ۳۰۴ با ضخامت ۰,۱ و ۰,۲ میلی‌متر در این مقاله مورد استفاده قرار گرفته است. به منظور بررسی اثر اندازه روی رفتار شکست ماده در فرایندهای میکرو شکل‌دهی، ورق‌ها تحت عملیات حرارتی آنیل در محدوده دمایی ۹۰۰ الی ۱۰۵۰ درجه

¹ Oh

² Normalized Cockcroft-Latham

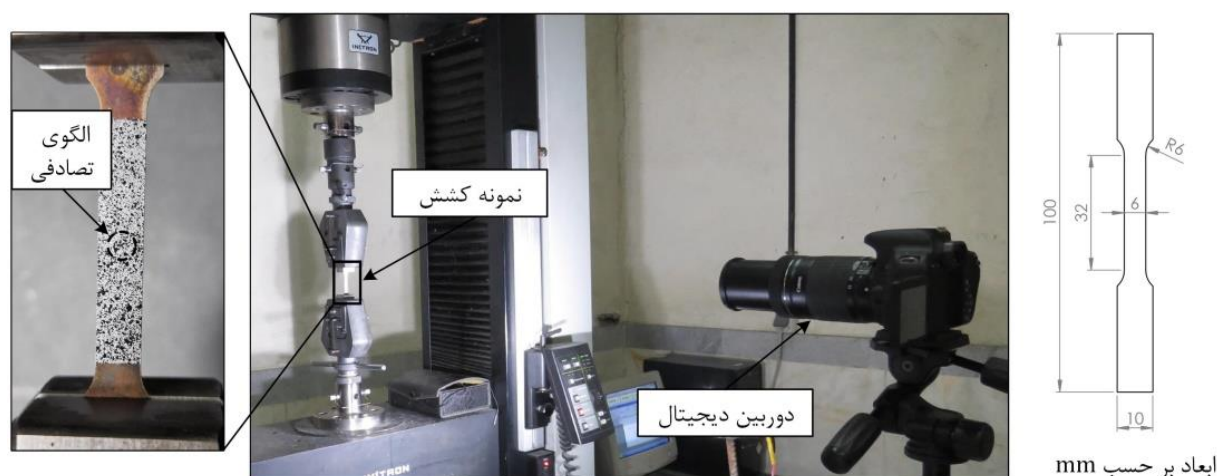
ساتنی‌گراد و مدت زمان ۱۵ دقیقه الی ۳ ساعت قرار گرفتند. برای این منظور از کوره القایی خلا مدل TF5/25-1250 با فشار هوای 5×10^{-3} پاسکال و نرخ حرارت‌دهی ۶۰ درجه سانتی‌گراد بر دقیقه استفاده شد. نمونه‌های مستطیلی با ابعاد 70×120 میلی‌متر برای مدت زمان و دمای تعیین شده در کوره قرار گرفتند و پس از انجام عملیات حرارتی در کوره تا دمای اتاق خنک شدند. از گاز محافظ آرگون برای جلوگیری از اکسید شدن سطح نمونه‌ها حین خنک شدن در کوره استفاده شد. پس از انجام عملیات حرارتی، آشکارسازی مرزدانه‌ها با انجام عملیات اچ الکترولیتی صورت گرفت. برای بررسی اثر عملیات حرارتی بر روی دانه‌بندی ورق، نیاز به بررسی ریزساختار ماده با روش متالوگرافی استاندارد می‌باشد. برای این منظور نمونه‌سازی از روی نمونه‌های ورق با ابعاد 5×20 میلی‌متر به روش مانع سرد انجام شد. در مرحله بعد، سطح نمونه با ورق سنباده و سپس با ذرات ساینده آلومینا با اندازه دانه $0/3$ میکرومتر پولیش شد؛ سپس مقطع نمونه‌ها با کمک میکروسکوپ نوری مدل M51 OLYMPUS BX مورد بررسی قرار گرفت تا بتوان اندازه دانه میانگین را به روش خطوط متقاطع تعیین نمود. پارامترهای عملیات حرارتی آنیل به همراه مقادیر اندازه دانه متناظر در جدول ۱ ذکر شده است.

پارامتر فاکتور مقیاس به صورت نسبت ضخامت به اندازه دانه میانگین ورق تعریف می‌شود. محاسبه پارامتر فاکتور مقیاس نشان می‌دهد که مقدار آن برای تمامی نمونه‌ها کم‌تر از ده به دست آمده است؛ بنابراین، برای تمامی نمونه‌های عملیات حرارتی شده، اثر اندازه روی رفتار ماده در مقیاس میکرو اثرگذار می‌باشد.

جدول ۱ پارامترهای عملیات حرارتی آنیل به همراه اندازه دانه متناظر

فاکتور مقیاس	اندازه دانه (μm)	زمان (h)	دما ($^{\circ}\text{C}$)	ضخامت (mm)
8.4	11.8	0.25	900	0.1
6.7	14.9	0.25	1000	
4.3	23.2	1	1000	
1.2	81.7	2	1050	
9.9	20.1	0.25	950	0.2
6.4	31.1	1	1000	
3.8	52.0	2	1050	
1.9	103.3	3	1050	

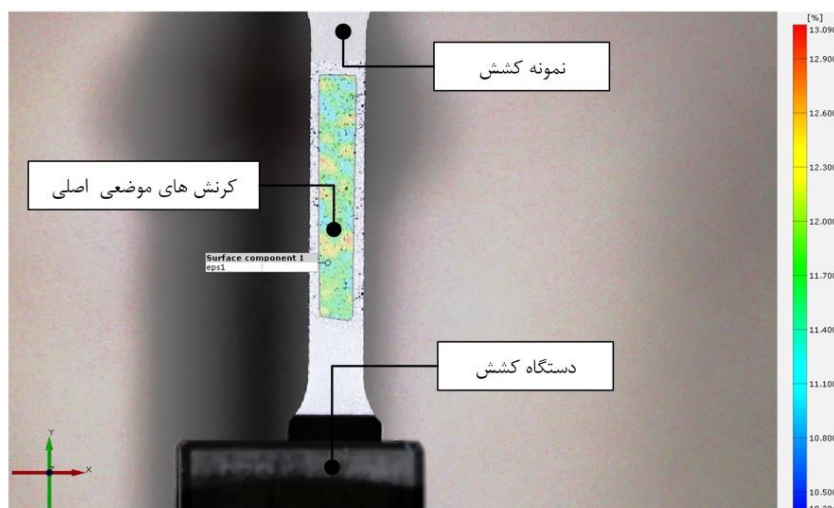
در مرحله بعد، آزمون کشش تک‌محوری بر روی نمونه‌های مختلف انجام شد. ابعاد نمونه‌ها با توجه به استاندارد ASTM E8 و در جهت نورد ورق انتخاب گردید. آزمون کشش بر روی دستگاه اینسترون^۱ با سرعت ۲ میلی‌متر بر دقیقه انجام شد و حداقل سه آزمون برای هر نمونه انجام گرفت. تجهیزات آزمون کشش به همراه ابعاد نمونه‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱ تجهیزات آزمون تجربی کشش

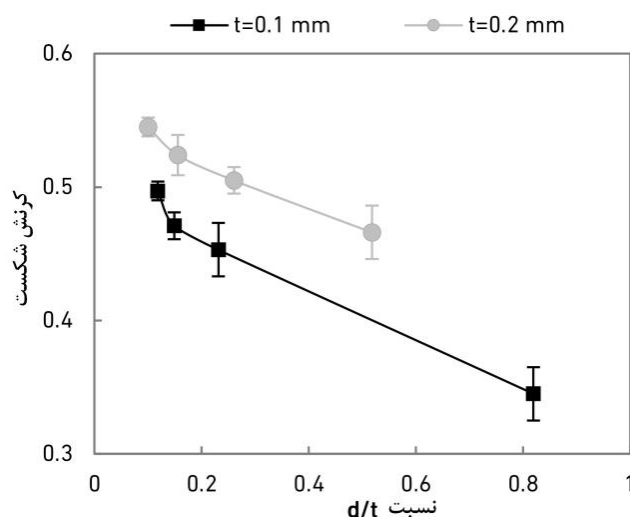
^۱ Instron

در آزمایش‌های تجربی از روش برهم‌نگاری تصاویر دیجیتال برای اندازه‌گیری کرنش حین آزمون استفاده شد. روش برهم‌نگاری تصاویر دیجیتال یک روش نوری برای اندازه‌گیری تجربی میدان‌های جابه‌جایی و کرنش از نمونه می‌باشد. در این روش از نمونه حین تغییر شکل عکس‌های متوالی گرفته می‌شود و با تعیین ارتباط بین عکس‌ها با استفاده از تکنیک‌های پردازش تصویر، جابه‌جایی و مشتقات آن به دست می‌آید. شکل ۲، توزیع کرنش موضعی روی سطح نمونه آزمون کشش را نشان می‌دهد.



شکل ۲ توزیع کرنش‌های اصلی روی سطح نمونه آزمون کشش

به‌منظور بررسی اثر اندازه روی رفتار شکست ماده، کرنش شکست نمونه‌های مختلف در شکل ۳ مقایسه شده است. نتایج آزمایش‌های تجربی نشان می‌دهد که کرنش شکست با افزایش نسبت اندازه دانه به ضخامت ورق کاهش می‌یابد. نتایج تجربی به دست آمده در این مرحله، برای کالیبراسیون و صحت‌سنجی معیار شکست اصلاح‌شده در گام‌های بعدی مورد استفاده قرار می‌گیرد.



شکل ۳ نتایج کرنش شکست تجربی برای نمونه‌های مختلف

۳- مدل تحلیلی

معیارهای شکست نرم پدیدارشناختی به‌صورت رابطه انتگرالی از تابع آسیب تعریف می‌شوند و برای پیش‌بینی لحظه شکست مورد استفاده قرار می‌گیرند. شکل کلی معیارهای شکست نرم به‌صورت رابطه ۱ ارائه می‌شود.

$$\int_0^{\bar{\epsilon}_f} g d\bar{\epsilon}_p = C \quad (1)$$

که در آن g ، $\bar{\epsilon}_p$ و C به ترتیب تابع ورنی، کرنش مومسان معادل و ثابت آسیب می‌باشند. معیار شکست آیادا اثر تنش هیدرواستاتیک را بر روی رشد آسیب در نظر می‌گیرد و با رابطه ۲ نشان داده می‌شود.

$$\int_0^{\bar{\epsilon}_f} \frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}} d\bar{\epsilon}_p = \int_0^{\bar{\epsilon}_f} \eta d\bar{\epsilon}_p = C \quad (2)$$

که در آن σ_m ، $\bar{\sigma}$ و η به ترتیب تنش هیدرواستاتیک، تنش معادل و پارامتر سه محوری تنش می‌باشند. معیارهای شکست نرم متداول، اثر اندازه در مقیاس میکرو را در نظر نمی‌گیرند. اصلاح معیار شکست نرم با تعریف ثابت آسیب به صورت تابعی از ضخامت و اندازه دانه ورق مطابق رابطه ۳ انجام می‌شود.

$$C = \int_0^{\bar{\epsilon}_f} d\bar{\epsilon}_p = \epsilon_f(t, d) \quad (3)$$

که $\epsilon_f(t, d)$ با استفاده از آزمون کشش تک‌محوری ورق‌های با ضخامت و اندازه دانه مختلف به دست می‌آید. مطابق شکل ۲، کرنش شکست نمونه‌های مختلف رابطه خطی با نسبت d/t دارد. بنابراین، ϵ_f را می‌توان به صورت رابطه ۴ تعریف کرد.

$$C = \epsilon_f(t, d) = C_1 - (d/t)C_2 \quad (4)$$

که C_1 و C_2 ثابت‌های ماده می‌باشند. با جایگذاری رابطه ۴ در رابطه ۲، معیار شکست آیادا اصلاح‌شده به صورت رابطه ۵ به دست می‌آید.

$$\int_0^{\bar{\epsilon}_f} \eta d\bar{\epsilon}_p = C_1 - (d/t)C_2 \quad (5)$$

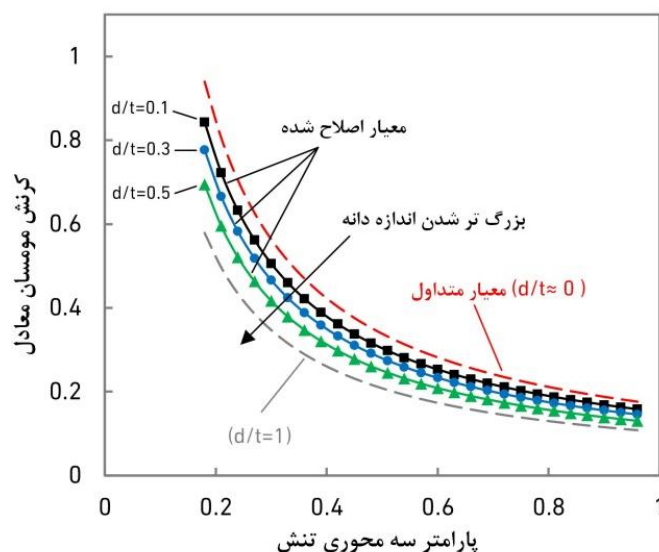
با در نظر گرفتن پارامتر سه محوری تنش (η) برابر با ۰,۳۳ در آزمون کشش تک‌محوری می‌توان رابطه ۵ را به شکل نرمال شده به فرم کلی رابطه ۶ تبدیل کرد.

$$D = \int_0^{\bar{\epsilon}_f} \frac{3\eta}{C_1 - (d/t)C_2} d\bar{\epsilon}_p = 1 \quad (6)$$

که D نشانگر آسیب است و رسیدن آن به یک نشان‌دهنده شروع وقوع شکست است. با فرض بارگذاری متناسب حین فرایند، مکان هندسی شکست به دست آمده از معیار آیادا اصلاح‌شده به صورت رابطه ۷ به دست می‌آید.

$$\bar{\epsilon}_f = \frac{C_1 - (d/t)C_2}{3\eta} \quad (7)$$

مکان هندسی شکست به دست آمده از معیار شکست آیادا اصلاح‌شده برای مقادیر مختلف نسبت d/t در شکل ۴ ترسیم شده است.



شکل ۴ شماتیک مکان هندسی شکست معیار آیادا اصلاح‌شده

۴- نتایج و بحث

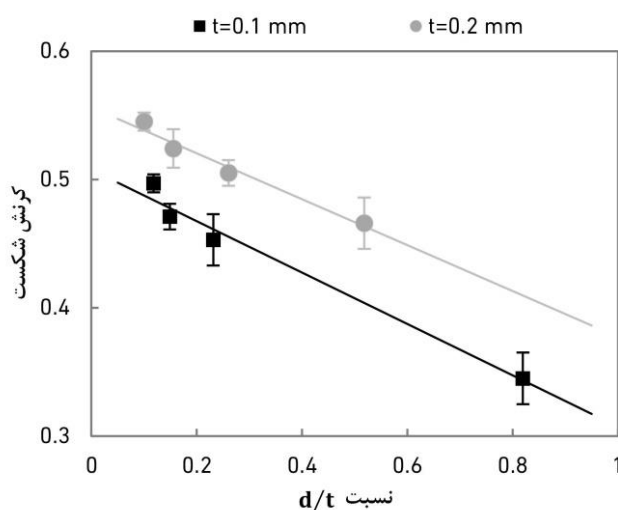
۴-۱- کالیبراسیون معیار شکست

مطابق مدل آسیب ارائه شده، شکست هنگامی اتفاق می‌افتد که ثابت آسیب به مقدار بحرانی برسد. با توجه به این‌که ثابت آسیب در معیار شکست اصلاح‌شده به صورت تابعی از ضخامت و اندازه دانه ورق تعریف شده است، مقادیر ثابت‌های ماده برای کالیبراسیون معیار بایستی محاسبه شوند. مقادیر ثابت‌های کالیبراسیون برای هر ورق که به روش حداقل مربعات محاسبه شده، در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲ مقادیر پارامترهای معیار آیادا اصلاح‌شده

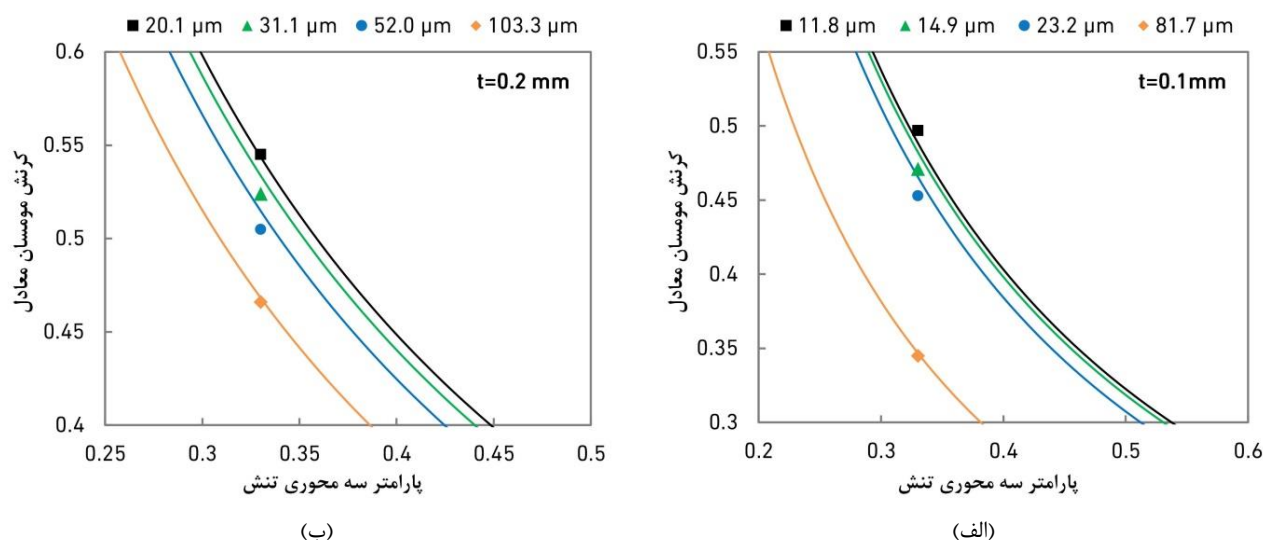
ضخامت (mm)	C_1	C_2
0.1	0.507	0.200
0.2	0.556	0.179

رابطه کرنش شکست با نسبت d/t در شکل ۵ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که کرنش شکست با تغییر ضخامت و اندازه دانه ورق تغییر می‌کند و رابطه خطی با نسبت d/t دارد. مقدار کرنش شکست به دست آمده برای ورق با ضخامت ۰٫۲ میلی‌متر بزرگ‌تر از ورق با ضخامت ۰٫۱ میلی‌متر است. هم‌چنین، پراکندگی مقادیر کرنش شکست با افزایش نسبت d/t بیش‌تر می‌شود که به علت تغییر شکل غیرهمگن در نمونه با بزرگ‌تر شدن اندازه دانه ورق است.

شکل ۵ تغییرات کرنش شکست نسبت به پارامتر d/t

۴-۲- صحت‌سنجی معیار شکست

کالیبراسیون معیار شکست با استفاده از نتایج آزمایش‌های تجربی آزمون کشش تک‌محوری انجام شد. به این ترتیب، مکان هندسی شکست معیار آیادا اصلاح‌شده به صورت تابعی از ضخامت و اندازه دانه ورق در مقیاس میکرو به دست آمد. منحنی حد شکست به دست آمده برای نمونه‌های با ضخامت و اندازه دانه مختلف در شکل ۶ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که منحنی حد شکست به دست آمده از معیار آیادا اصلاح‌شده با بزرگ‌تر شدن اندازه دانه ورق به سمت پایین جابه‌جا می‌شود. این تغییرات تطابق خوبی با نتایج تجربی به دست آمده برای کرنش شکست نمونه‌های مختلف دارد. کاهش کرنش شکست در این حالت به این علت است که با بزرگ‌تر شدن اندازه دانه، رشد و به هم پیوستگی حفره‌ها تسریع می‌شود و شکست زودتر اتفاق می‌افتد. افزون بر این، پیش‌بینی معیار شکست اصلاح‌شده اندکی بالاتر از مقادیر تجربی است که نشان‌دهنده تخمین شکل‌پذیری ماده اندکی بیش از مقدار واقعی می‌باشد.



شکل ۶ مدل‌سازی اثر اندازه روی مکان هندسی شکست برای ورق با ضخامت (الف) ۰,۱ میلی‌متر (ب) ۰,۲ میلی‌متر

مقدار خطای پیش‌بینی کرنش شکست با مقایسه نتایج پیش‌بینی مدل تحلیلی با نتایج آزمون‌های تجربی کشش برای نمونه‌های مختلف به دست می‌آید. مقادیر خطای پیش‌بینی برای ورق‌های با ضخامت ۰,۱ و ۰,۲ میلی‌متر در جدول ۳ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که معیار شکست اصلاح شده و کالیبره شده با استفاده از نمونه‌های با ضخامت و اندازه دانه مختلف می‌تواند با دقت خوبی لحظه وقوع شکست در نمونه‌های مقیاس میکرو را پیش‌بینی نماید.

جدول ۳ خطای پیش‌بینی معیار آیادا اصلاح‌شده

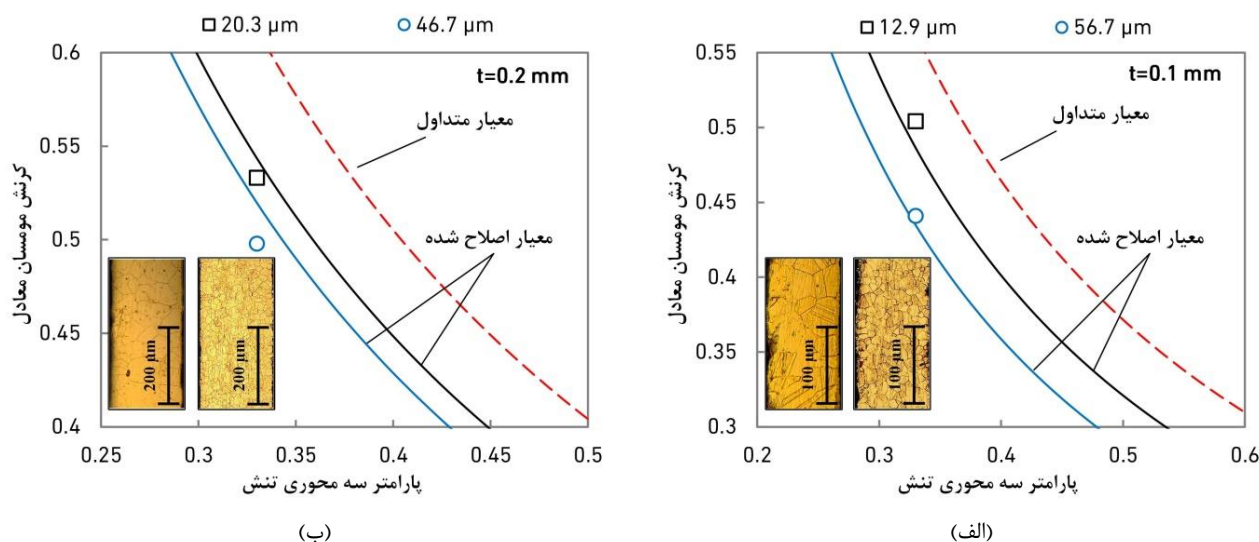
خطا (%)	اندازه دانه (μm)	ضخامت (mm)
1.7	11.8	0.1
2.4	14.9	
2.8	23.2	
0.6	81.7	
0.2	20.1	0.2
2.8	31.1	
1.9	52.0	
0.5	103.3	

۴-۳- ارزیابی معیار شکست

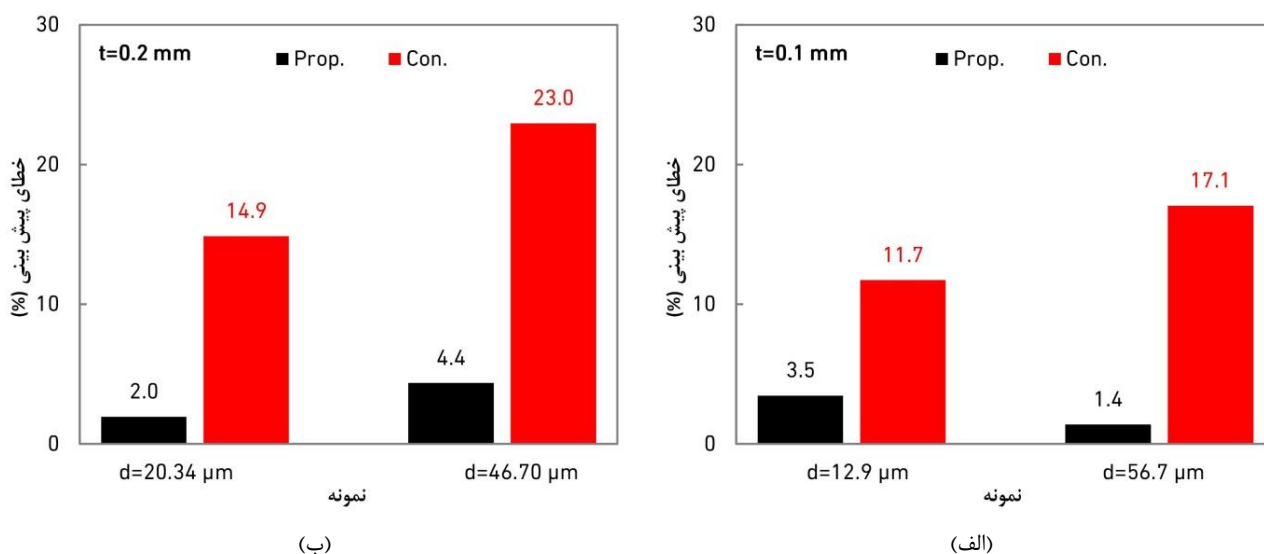
به‌منظور ارزیابی معیار شکست آیادا اصلاح‌شده، آزمون کشش تک‌محوری برای نمونه‌های جدید در هر دو ضخامت ۰,۱ و ۰,۲ میلی‌متر انجام شد. از معیار شکست کالیبره شده در مرحله قبل برای پیش‌بینی کرنش شکست نمونه‌های جدیدی که در فرایند کالیبراسیون معیار شرکت نداشتند، استفاده گردید. منحنی حد شکست پیش‌بینی شده با استفاده از معیار آیادا برای دو حالت متداول و اصلاح‌شده در شکل ۷ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که معیار متداول با جاگذاری مقدار $d/t = 0$ در معیار اصلاح‌شده به دست می‌آید. نتایج بیانگر اختلاف زیاد بین پیش‌بینی معیار متداول با نتایج تجربی است؛ به‌طوری‌که با بزرگ‌تر شدن اندازه دانه ورق مقدار خطای پیش‌بینی زیاد می‌شود. از سوی دیگر، پیش‌بینی معیار شکست اصلاح‌شده توفیق خوبی با نتایج آزمون‌های تجربی برای نمونه‌های با ضخامت و اندازه دانه مختلف دارد. با توجه به این‌که معیار اصلاح‌شده اثر اندازه روی رفتار شکست ماده را در نظر می‌گیرد، پیش‌بینی دقیقی از کرنش شکست نمونه‌های مختلف در مقیاس میکرو ارائه می‌نماید.

خطای پیش‌بینی کرنش شکست برای نمونه‌های مختلف در شکل ۸ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که بیشینه خطای پیش‌بینی معیار متداول به ۲۳ درصد می‌رسد. در حقیقت با کم شدن ضخامت یا بزرگ‌تر شدن اندازه دانه ورق، رفتار ماده تحت تاثیر اثر اندازه تغییر می‌کند و نمی‌توان از اثر اندازه صرف‌نظر کرد. این در حالی است که معیار متداول به صورت مستقل از اثر اندازه تعریف

شده است و توانایی پیش‌بینی دقیق رفتار ماده در مقیاس میکرو را ندارد. از سوی دیگر، پیش‌بینی کرنش شکست با معیار آیادا اصلاح‌شده با بیشینه خطای ۴,۴ درصد انجام شود. بر این اساس می‌توان نتیجه گرفت که معیار شکست اصلاح‌شده توانایی پیش‌بینی دقیق کرنش شکست نمونه‌ها را دارد و استفاده از آن موجب کاهش چشم‌گیر خطای پیش‌بینی در مقیاس میکرو می‌گردد.



شکل ۷ منحنی حد شکست برای نمونه‌های جدید، الف) ضخامت ۰,۱ میلی‌متر، ب) ضخامت ۰,۲ میلی‌متر



شکل ۸ خطای پیش‌بینی کرنش شکست برای نمونه‌های جدید، الف) ضخامت ۰,۱ میلی‌متر، ب) ضخامت ۰,۲ میلی‌متر

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، رفتار شکست ورق فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ در مقیاس میکرو مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور، آزمون کشش برای نمونه‌های با ضخامت ۰,۱ و ۰,۲ میلی‌متر و اندازه دانه‌های مختلف انجام شد. مقادیر کرنش شکست برای نمونه‌های مختلف به صورت مستقیم از آزمون تجربی با استفاده از روش برهم‌نگاری تصاویر دیجیتال به دست آمد. بر اساس نتایج به دست آمده، معیار شکست نرم آیادا با در نظر گرفتن اثر اندازه نمونه و اندازه دانه در مقیاس میکرو اصلاح گردید. بر اساس بررسی تجربی و تحلیلی انجام شده، نتایج زیر استخراج گردید:

- کرنش شکست ماده در مقیاس میکرو تحت تأثیر اثر اندازه در مقیاس میکرو قرار می‌گیرد و روند کاهشی محسوسی را همراه با کاهش نسبت ضخامت به‌اندازه دانه ورق نشان می‌دهد.
- بزرگ‌تر شدن اندازه دانه ورق موجب ایجاد تغییر شکل غیرهمگن در نمونه می‌شود. این عامل موجب پراکندگی مقادیر کرنش شکست همراه با بزرگ‌تر شدن اندازه دانه ورق در مقیاس میکرو می‌شود.
- معیار شکست متداول، شکل‌پذیری ماده در مقیاس میکرو را بیش‌تر از مقدار واقعی تخمین می‌زند. این موضوع به علت صرف‌نظر کردن از اثر اندازه است و موجب می‌شود تا خطای پیش‌بینی معیار متداول با کاهش نسبت ضخامت به‌اندازه دانه ورق تا ۲۳ درصد افزایش یابد. این به معنای مناسب نبودن معیارهای متداول برای پیش‌بینی رفتار شکست ماده در مقیاس میکرو می‌باشد.
- معیار شکست آیادا با در نظر گرفتن اثر اندازه روی ثابت آسیب معیار اصلاح شد. منحنی‌های حد شکست به‌دست آمده از معیار اصلاح‌شده تطابق خوبی با روند کاهشی کرنش شکست با کاهش نسبت ضخامت به‌اندازه دانه ورق در مقیاس میکرو دارد. پیش‌بینی کرنش شکست با استفاده از معیار آیادا اصلاح‌شده با بیشینه خطای ۴,۴ درصد انجام شد.

References

- [1] Engel U, Eckstein R. Microforming—from basic research to its realization. *Journal of Materials Processing Technology*. 2002 Sep 9;125:35-44. doi: 10.1016/s0924-0136(02)00415-6
- [2] Karimi Firouzjaei M, Moslemi Naeini H, Kasaei MM, Mirnia MJ. A constitutive model for stainless steel 304 sheet considering size effect in micro-scale. *Modares Mechanical Engineering*. 2022 Aug 10;22(8):519-28. doi: 10.52547/mme.22.8.519 [In Persian]
- [3] Hajiahmadi S, Naeini HM, Talebi-Ghadikolaee H, Safdarian R, Zeinolabedin-Beygi A. Effect of anisotropy on spring-back of pre-punched profiles in cold roll forming process: an experimental and numerical investigation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2023 Dec;129(9):3965-78. doi: 10.1007/s00170-023-12516-5
- [4] Karimi Firouzjaei M, Moslemi Naeini H, Farahmand HR, Abbaszadeh B, Kasaei MM. Numerical and experimental investigation on flower pattern design methods in cold roll forming process of a high strength steel pipe. *Modares Mechanical Engineering*. 2018 Jan 10;17(10):259-70. [In Persian]
- [5] Talebi-Ghadikolaee H, Moslemi Naeini H, Rabiee AH, Zeinolabedin Beygi A, Alexandrov S. Experimental-numerical analysis of ductile damage modeling of aluminum alloy using a hybrid approach: ductile fracture criteria and adaptive neural-fuzzy system (ANFIS). *International Journal of Modelling and Simulation*. 2023 Sep 3;43(5):736-51. doi: 10.1080/02286203.2022.2121675
- [6] Khademi M, Naeini HM, Mirnia MJ, Kasaei MM, da Silva LF. Fracture prediction of AA6061-T6 sheet in bending process using Gurson–Tvergaard–Needleman model. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*. 2023 Dec;237(12):2506-19. doi: 10.1177/14644207221134504
- [7] Kasaei MM, Naeini HM, Abbaszadeh B, Mohammadi M, Ghodsi M, Kiuchi M, Zolghadr R, Liaghat G, Tafti RA, Tehrani MS. Flange wrinkling in flexible roll forming process. *Procedia Engineering*. 2014 Jan 1;81:245-50. doi: 10.1016/j.proeng.2014.09.158
- [8] Amini A, Naeini HM, Azodi HD, Talebi-Ghadikolaee H, Badparva H, Zeinolabedin-Beygi A. Hydro-mechanical deep drawing of conical components: Wrinkling behavior and process enhancement. *Journal of Engineering Research*. 2024 Apr 9. doi: 10.1016/j.jer.2024.04.005
- [9] Talebi-Ghadikolaee H, Elyasi M, Dadgar Asl Y, Zeinolabedin Beygi A, Davoudi M. Feasibility of forming U-shaped microchannels by flexible-die forming process. *Karafan Quarterly Scientific Journal*. 2022 Nov 22;19(3):53-70. doi: 10.48301/kssa.2022.336972.2063 [In Persian]
- [10] Karimi Firouzjaei M, Moslemi Naeini H, Kasaei MM, Abbaszadeh B, da Silva LF. Effect of flower pattern design on the springback of high strength steel in cold roll forming process of pipes. In *International Conference on Mechanics of Solids 2022 Nov 3* (pp. 49-61). Cham: Springer International Publishing. doi: 10.1007/978-3-031-26797-0_5
- [11] Elyasi M, Talebi-Ghadikolaee H, Zeinolabedin-Beygi A, Modanloo V, Khatir FA. The effect of aging heat treatment on the formability and microstructure of the AA6063 tube in the rotary draw bending process. *Journal of Engineering Research*. 2023 Oct 11. doi: 10.1016/j.jer.2023.10.017
- [12] Firouzjaei MK, Naeini HM, Kasaei MM, Mirnia MJ, da Silva LF. A microscale constitutive model for thin stainless steel sheets considering size effect. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L:*

- Journal of Materials: Design and Applications. 2023 Oct;237(10):2104-14. doi: [10.1177/14644207231169456](https://doi.org/10.1177/14644207231169456)
- [13] Fu MW, Chan WL. Geometry and grain size effects on the fracture behavior of sheet metal in micro-scale plastic deformation. *Materials & Design*. 2011 Dec 1;32(10):4738-46. doi: [10.1016/j.matdes.2011.06.039](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.06.039)
- [14] Parasiz SA, VanBenthysen R, Kinsey BL. Deformation size effects due to specimen and grain size in microbending. *Journal of manufacturing science and engineering*. 2010 Jan;132(1):327-36. doi: [10.1115/msec2010-34038](https://doi.org/10.1115/msec2010-34038)
- [15] Meng B, Zhang YY, Cheng C, Han JQ, Wan M. Effect of plastic anisotropy on microscale ductile fracture and microformability of stainless steel foil. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2018 Nov 1;148:620-35. doi: [10.1016/j.ijmecsci.2018.09.027](https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2018.09.027)
- [16] Xu ZT, Peng LF, Lai XM, Fu MW. Geometry and grain size effects on the forming limit of sheet metals in micro-scaled plastic deformation. *Materials Science and Engineering: A*. 2014 Aug 12;611:345-53. doi: [10.1016/j.msea.2014.05.060](https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.05.060)
- [17] Ran JQ, Fu MW. Applicability of the uncoupled ductile fracture criteria in micro-scaled plastic deformation. *International Journal of Damage Mechanics*. 2016 Apr;25(3):289-314. doi: [10.1177/1056789515578181](https://doi.org/10.1177/1056789515578181)
- [18] Bao ME, Jiejie SH, Zhang Y, Cheng C, Bolin MA, Min WA. Feasibility evaluation of failure models for predicting forming limit of metal foils. *Chinese Journal of Aeronautics*. 2020 Sep 1;33(9):2461-71. doi: [10.1016/j.cja.2019.09.002](https://doi.org/10.1016/j.cja.2019.09.002)
- [19] Firouzjaei MK, Naeini HM, Kasaei MM, Mirnia MJ, da Silva LF. Microscale modeling of the ductile fracture behavior of thin stainless steel sheets. *Thin-Walled Structures*. 2024 Mar 1;196:111457. doi: [10.1016/j.tws.2023.111457](https://doi.org/10.1016/j.tws.2023.111457)