

## دو روش مختلف اندازه‌گیری آسیب نرم برای فولاد ضد زنگ 316L

مسلم بهرامی

دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

فرهاد حاجی ابوطالبی\*

استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

ابوالفضل درویشه

استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

رضا انصاری خلخالی

دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

### چکیده

آسیب فرآیند فیزیکی پیشرونده‌ای است که در نهایت منجر به شکست ماده می‌گردد. در خلال فرآیند آسیب، ماده تغییراتی از قبیل جوانه‌زنی، رشد و به هم پیوستن حفره‌های میکروسکوپی و ترک‌های ریز را تجربه می‌کند. اگر ماده فلزی تحت کرنش پلاستیک قرار گیرد عیوبی مانند حفره‌ها و میکروتوک‌ها ایجاد می‌گردد. با افزایش کرنش پلاستیک، این عیوب توسعه پیدا کرده و در نتیجه ترک در ماده به‌وجود می‌آید که سبب شکست در آن می‌شود. بنابراین اندازه‌گیری آسیب دارای اهمیت زیادی بوده و تاکنون روش‌های مختلفی برای تخمین آسیب در مواد ارائه گردیده است. در این مقاله ابتدا روش‌های مختلف تعیین آسیب نرم بیان گردیده و سپس با استفاده از روش‌های اندازه‌گیری مدول الاستیک و نیز اندازه‌گیری سرعت انتشار امواج آلتراسونیک به تخمین میزان آسیب نرم در فولاد ضد زنگ 316L پرداخته می‌شود. در آخر مقدار پارامتر آسیب نرم بحرانی ماده با هر یک از این روش‌ها محاسبه گردیده و مقایسه می‌شود. **واژه‌های کلیدی:** آسیب نرم، آزمایش مدول الاستیک، آزمایش آلتراسونیک، پارامتر آسیب نرم بحرانی.

## Two different methods of measuring ductile damage for stainless steel 316L

M. Bahrami

Mechanical Engineering, University of Gilan, Rasht, Iran

F. Haji Aboutaleb

Department of Mechanical Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran

A. Darvizeh

Mechanical Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran

R. Ansari Khalkhali

Mechanical Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran

### Abstract

Damage is a progressive physical process, which at last leads to failure. During the damage process, material experiences some changes such as nucleation, growth, and coalescence of microscopic voids and microcracks. If the metal material is under the plastic strain, some defects like voids and microcracks are created. Increasing the plastic strains, these defects develop and eventually crack is created in the material which causes fracture in it. Therefore, measuring the damage is very important and various methods have been proposed to determine the damage in materials yet. In this paper first, different methods of estimating the ductile damage are presented and then, ductile damage for stainless steel 316L is determined, using the measurement of elasticity modulus and also measurement of velocity of ultrasonic wave propagation methods. Finally, value of critical ductile damage parameter for the material is calculated by each of these methods and compared.

**Keywords:** ductile damage, modulus of elasticity test, ultrasonic test, critical ductile damage parameter.

### ۱-مقدمه

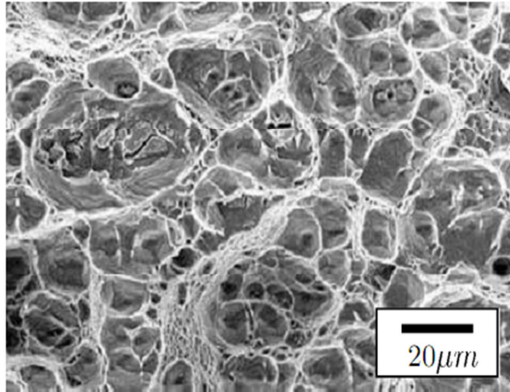
آسیب مواد، یک فرآیند میکروسکوپی است که طی آن بافت ماده دچار تغییراتی می‌شود که از آن جمله می‌توان به جوانه‌زنی، رشد و به هم پیوستن حفره‌های میکروسکوپی و ترک‌های ریز به هنگام بارگذاری اشاره نمود. اندازه‌گیری پارامتر آسیب به روش مستقیم از طریق اندازه‌گیری مساحت ریزترک‌ها و عیوب موجود در ماده تنها با استفاده از تصاویر میکروگراف تهیه شده به کمک تجهیزات پیشرفته آزمایشگاهی امکان‌پذیر بوده که این روش در عمل بسیار مشکل می‌باشد. در روش‌های غیرمستقیم، با انتخاب تعریفی بر مبنای مفهوم تنش موثر و اندازه‌گیری بر اساس این مفهوم، پلی بین تغییرشکل و پدیده آسیب برقرار می‌شود. این اندازه‌گیری‌ها که به تغییرات خواص فیزیکی یا مکانیکی ماده به‌واسطه رشد آسیب وابسته است شامل ارزیابی خواص فیزیکی مانند مقاومت الکتریکی، الاستیسیته، پلاستیسیته و ویسکوپلاستیسیته می‌باشد [۱].

### ۱-۱- مدل های آسیب نرم

مطابق شکل ۱، ساختار شکست نرم معمولاً طی سه مرحله تجمع آسیب، آغاز شکست و انتشار ترک انجام می‌پذیرد [۱]. از دیدگاه میکروسکوپی، ایجاد آسیب حاصل جوانه‌زنی حفره، رشد حفره، به هم پیوستن حفره‌ها و انتشار ریز ترک‌ها می‌باشد. هم‌چنین از دیدگاه ماکروسکوپی، کاهش خواص مکانیکی و از جمله کاهش مدول الاستیک را به همراه دارد. این تغییرات را می‌توان به عنوان شاخص‌هایی برای آغاز شکست در نظر گرفت [۲].

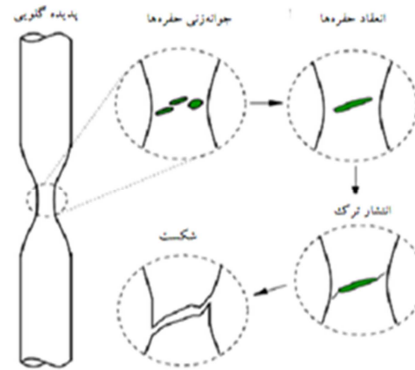
از اوایل سال ۱۹۷۰ میلادی کوشش‌های بسیاری برای مدل نمودن پدیده آسیب نرم صورت پذیرفته است. عموماً دو دیدگاه مختلف برای مدل نمودن آسیب در مواد مهندسی استفاده می‌گردد. اولی دیدگاه میکروسکوپی می‌باشد که در آن تحول متغیرهای میکروسکوپی همانند حفره‌ها و ترک‌ها مورد آزمایش قرار می‌گیرند. دیدگاه دوم، دیدگاه

\* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: f.hajiboutaleb@eng.ui.ac.ir



شکل ۲- تصویر میکرو ساختار ماده [۲]

ماکروسکوپی می‌باشد که در آن ماده با پاسخ‌های کلی بیان می‌گردد. در هر دو گروه مدل‌های عددی بسیاری ارائه گردیده است. این مدل‌ها می‌توانند در سه گروه مشخص‌تر بر پایه فیزیکی، مدل‌های پدیدار شناختی و مدل‌های تجربی نیز بحث گردند.



شکل ۱- میکرو ساختار شکست نرم [۱]

دومین دسته از مدل‌های شکست نرم، مدل‌های تجربی نامیده می‌شوند. تاکنون بررسی‌های تجربی زیادی بر روی مشخصه‌های شکست نرم صورت پذیرفته است. کلایزینگ مطالعه تجربی بر روی نمونه‌های متقارن محوری و نیز نمونه‌های کرنش صفحه‌ای بر روی چندین ماده را انجام داد [۱۲]. هانکوک و مکنزی روابط بین کرنش پلاستیک و سه محوری تنش<sup>۵</sup> را برای سه فولاد مختلف تعیین نمودند [۱۳]. آنها از نمونه‌های متقارن محوری شکافدار استفاده کرده و به این نتیجه رسیدند که نمونه‌هایی که در آنها، مقدار سه‌محوری تنش بیشتر است، مقدار کرنش شکست کمتر بوده و به عبارت دیگر، شکست در آنها سریعتر رخ می‌دهد. هانکوک و براون از نتایج آزمایشگاهی نمونه‌های شکافدار متقارن محوری و نمونه‌های تخت شیاردار کرنش صفحه‌ای دریافتند که کرنش پلاستیک به حالت تنش وابسته است [۱۴]. جانسون و کوک با استفاده از آزمایش‌های کینسون نشان دادند که تاثیر سه محوری تنش بسیار بیشتر از نرخ کرنش و دما می‌باشد [۱۵]. در ادامه به معرفی دو مدل میکرومکانیکی و تجربی پرداخته می‌شود:

#### الف) مدل مک کلینتوک (McCl)

در این دسته، مکانیزم شکست نرم به صورت رشد، جوانه‌زنی و به هم پیوستن حفره‌ها تعریف می‌گردد [۳ و ۴]. مک کلینتوک، رشد و به هم پیوستن حفره‌های استوانه‌ای را تحلیل نمود و به نقش مهم سه‌محوری تنش در شکست نرم پرداخت.

#### ب) مدل جانسون کوک

رفتار مکانیکی اکثر فلزات به دما و نرخ کرنش وابسته است. جانسون و کوک در سال ۱۹۸۳ با استفاده از آزمایش‌هایی که هانکوک و مکنزی بر روی فلزات مختلف انجام دادند، یک رابطه تجربی را برای بیان اثر هم‌زمان حرارت و نرخ کرنش ارائه نمودند که در محاسبات عددی کاربرد زیادی دارد [۱۵].

مطابق شکل ۲، در مدل‌های میکرومکانیکی، مواد در المان‌های ناهمگن با فرض حفره‌ها و ترک‌های ریز در نظر گرفته می‌شوند [۲]. پاسخ ماکروسکوپی مواد توسط پاسخ‌های عمومی المان‌های شامل حفره تعیین می‌گردند. مدل‌سازی میکرومکانیکی می‌تواند به سه زیر گروه مدل‌سازی حفره‌زایی<sup>۱</sup>، مدل‌سازی رشد حفره<sup>۲</sup> و مدل‌سازی به هم پیوستن حفره‌ها<sup>۳</sup> تقسیم گردد. بررسی‌های اولیه توسط مک کلینتوک [۳] و رایس و تریسی [۴] بر روی رشد حفره‌ها انجام گردید. هم‌چنین گرسون یک مدل پلاستیسیته متخلخل<sup>۴</sup> پیشنهاد کرد که اساس آن بر تحلیل میکرومکانیکی پوسته کروی ضخیم در معرض فشار هیدرواستاتیک بود [۵]. مدل اولیه گرسون برای چندین مرتبه و با در نظر گرفتن فرآیندهای اضافی مورد بازنگری قرار گرفت. جوانه‌زنی حفره توسط چو و نیدلمن [۶]، کاهش تحمل ظرفیت بار با اتصال حفره‌ها توسط تورگارد و نیدلمن [۷]، گسترش مدل‌های کرنش سختی توسط لبلوند و همکاران [۸] و تاثیر شکل حفره‌ها توسط گلوگانو و همکاران [۹]، از این موارد بوده است. هم‌چنین گارجو و همکاران [۱۰] و پاروئن و هاتچینسون [۱۱] اصلاحات دیگری بر روی مدل گرسون انجام دادند. مدل‌های نوع گرسون نه تنها رفتار ماکروسکوپی پلاستیک ماده را با در نظر گرفتن کسر حجمی حفره‌های کوچک شرح می‌دهد بلکه کرنش شکست نرم را با در نظر گرفتن این‌که شکست زمانی رخ خواهد داد که کسر حجمی حفره‌ها به مقدار بحرانی برسد، پیش بینی می‌نماید.

### ۲-۱- اندازه‌گیری آسیب نرم

آسیب نرم به‌طور مستقیم در هنگام آزمون کشش و در مقادیر تنش و کرنش‌های مختلف قابل اندازه‌گیری نمی‌باشد. با این وجود روش‌های

<sup>1</sup> Void nucleation modeling

<sup>2</sup> Void growth modeling

<sup>3</sup> Void coalescence modeling

<sup>4</sup> Porous plasticity

<sup>5</sup> Stress triaxiality

گرفت و نیز می‌توان کلیه خصوصیات آسیب را بر روی آن تعریف نمود. ابعاد این المان به صورت مکعبی در نظر گرفته شده و طول هر وجه آن از ۰/۱ تا ۱۰۰ میلی متر برای مواد گوناگون متغیر است. ترک در یک ماده در واقع یک ناپیوستگی به اندازه المان حجمک نماینده است [۱]. با توجه به نوع ماده، شرایط بارگذاری و همچنین شرایط دمایی، مشخصه‌های فرایند آسیب نیز متفاوت خواهد بود. لذا بر این اساس انواع آسیب بدین گونه تعریف می‌شود:

الف) آسیب نرم: آسیب نرم هنگامی رخ می‌دهد که رشد و جوانه‌زنی حفره‌ها در ماده تحت بارگذاری، با کرنش پلاستیک بزرگ همراه باشد. این آسیب در فرآیندهای شکل دهی فلزات رخ می‌دهد.

ب) آسیب ترد: آسیب ترد زمانی رخ می‌دهد که ایجاد ترک و شروع شکست با کرنش پلاستیک ناچیزی همراه باشد. این نوع آسیب معمولاً در سرامیک‌ها، شیشه و فولادهای سردکاری شده اتفاق می‌افتد.

آسیب با ایجاد سطوح آزاد ناپیوستگی منجر به تغییرات بسیاری در خواص ماده می‌گردد. اثرات آسیب بر سختی و استحکام مکانیکی ماده تحت کشش و فشار متفاوت است. این مطلب ناشی از اثرات متفاوتی است که کشش و فشار بر روی باز و بسته شدن ریزترک‌های موجود در ماده می‌گذارد. از جمله تغییرات دیگری که در اثر فرآیند آسیب در ماده رخ می‌دهد، می‌توان موارد زیر را نام برد:

کاهش مدول الاستیسیته، کاهش تنش تسلیم قبل و بعد از کارسختی، افزایش نرخ کرنش خزشی، کاهش سرعت امواج آلتراسونیک در ماده، کاهش چگالی ماده، افزایش مقاومت الکتریکی در ماده.

## ۲-۱- اندازه گیری آسیب نرم

اندازه‌گیری آسیب به روش مستقیم از طریق اندازه‌گیری مساحت ریز ترک‌ها و عیوب موجود در ماده، تنها با استفاده از تصاویر میکروگراف تهیه شده به کمک تجهیزات پیشرفته آزمایشگاهی امکان‌پذیر بوده و کار بسیار دشواری است [۱۸]. تعریف اندازه‌ای برای آسیب مکانیکی مساله دشواری به نظر می‌رسد، به عبارت دیگر معیار تشخیص در مقیاس میکروسکوپی بین یک المان حجمک نماینده آسیب دیده و یک حجمک نماینده بدون آسیب وجود ندارد. بنابراین لازم است متغیرهای درونی که باعث و عامل شکست در ماده هستند، تعریف گردند. دو نوع متداول پارامتر آسیب مرسوم می‌باشد:

الف) چگالی حجمی ریزحفره‌ها

ب) چگالی سطحی ریزحفره‌ها

اندازه‌گیری مستقیم آسیب بسیار دشوار می‌باشد بنابراین با انتخاب تعریفی بر مبنای مفهوم تنش موثر و اندازه‌گیری بر اساس این مفهوم، پلی بین تغییرشکل و پدیده آسیب برقرار می‌شود.

می‌توان با استفاده از مفهوم تنش مؤثر، آسیب را در معادلات ساختاری الاستیسیته، پلاستیسیته یا ویسکوپلاستیسیته وارد نمود و به این ترتیب به مجموعه‌ای از روش‌های اندازه‌گیری غیر مستقیم آسیب دست یافت. لازمه انجام هر یک از این روش‌ها ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی جهت انجام آزمایش‌های مکانیکی است. این روش‌ها به صورت تخریبی و یا غیرتخریبی انجام می‌گیرد. تغییرات پاسخ پلاستیک تحت بارگذاری خستگی و پاسخ خزشی از جمله روش‌های تخریبی و اندازه‌گیری تغییرات پتانسیل الکتریکی، تغییرات ریزسختی و اندازه‌گیری سرعت امواج آلتراسونیک، از نوع روش‌های غیرتخریبی می‌باشند [۱۹]. در

مختلفی برای تعیین آسیب نرم ارائه شده است. در همه‌ی این روش‌ها، آغاز انباشتگی آسیب و نیز تاریخچه آسیب مورد بررسی قرار گرفته است.

اندازه‌گیری مدول الاستیک یکی از روش‌های متداول برای به دست آوردن آسیب نرم می‌باشد که توسط لمتر [۱] ارائه و در ادامه توسط بناوا و همکاران [۱۶] توسعه داده شد. این روش شامل اندازه‌گیری مدول الاستیک در یک دوره بارگذاری و باربرداری متوالی در هر مرحله و مقایسه با مقدار مدول الاستیک اولیه می‌باشد.

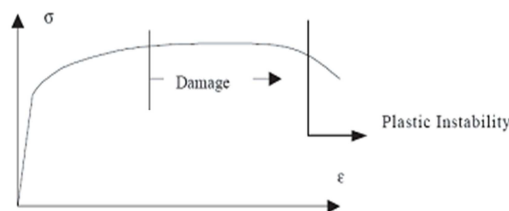
اندازه‌گیری سختی با همان اصول نظری اندازه‌گیری مدول الاستیک یکی دیگر از روش‌های تخمین آسیب نرم است. این روش نیز ابتدا توسط لمتر [۱] بیان گردید و در ادامه توسط گونلورجت [۱۷] مورد بررسی قرار گرفت.

روش محاسبه سرعت انتشار امواج آلتراسونیک و تغییرات پتانسیل الکتریکی از دیگر روش‌های محاسبه آسیب نرم است که توسط لمتر ارائه شده‌اند [۱].

## ۲- مکانیک آسیب

مکانیک آسیب زمینه تحقیقاتی جدیدی است که رفتار و پاسخ مواد تضعیف شده را بررسی می‌کند. تضعیف ماده، حاصل ترک‌های ریز با شکل نامنظم و جهات مختلف است که به صورت تصادفی در سراسر ماده پراکنده شده‌اند. مکانیک آسیب مطالعه‌ای است که کاهش تدریجی یا ناگهانی مقاومت مکانیکی، به واسطه بارگذاری، اثرات حرارتی یا شیمیایی را شامل می‌شود. لازم به ذکر است که مقیاس میکروسکوپی آسیب در مکانیک آسیب محیط پیوسته و مقیاس ماکروسکوپی در مکانیک شکست مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

همان‌گونه که بیان گردید آسیب یک فرایند میکروسکوپی می‌باشد که سبب تغییراتی در بافت و ساختار ماده می‌گردد که این امر می‌تواند سبب کاهش مدول الاستیک گردد. همچنین مکانیک آسیب می‌تواند یک ابزاری کارآمد در شبیه‌سازی شکست نرم باشد و مطابق شکل ۳ می‌تواند رفتار واماندگی ماده نرم را به خوبی ارزیابی کند. یکی از مزایای این روش در مقایسه با مکانیک کلاسیک، استقلال پارامترهای مدل از هندسه و نوع بارگذاری می‌باشد.



شکل ۳- نمایش آسیب نرم و ناپایداری پلاستیک [۱]

همچنین یک مفهوم به نام المان حجمک نماینده<sup>۱</sup> در مکانیک آسیب معرفی می‌گردد که به این معنا می‌باشد که المان حجمک نماینده کوچکترین المانی است که تنش وارد بر آن را می‌توان همگن در نظر

<sup>۱</sup>RVE (Represented Volume Element)

## ۲-۲- پارامتر آسیب

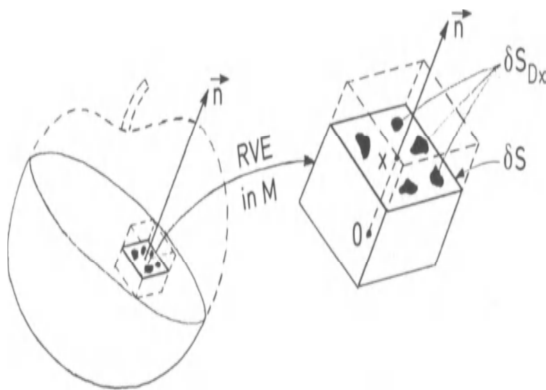
همان‌گونه که شکل ۶ نشان می‌دهد، پارامتر آسیب به عنوان چگالی سطحی ریزترک‌ها و ریزحفره‌های موجود در یک صفحه با سطح مقطع  $\delta S$  که بردار نرمال  $\vec{n}$  آن را قطع می‌کند، تعریف می‌شود. بنابراین اگر مجموع مساحت ریزترک‌ها و ریزحفره‌ها در یک صفحه با مساحت  $\delta S_D$  تعریف گردد، پارامتر آسیب را می‌توان به صورت رابطه زیر نوشت:

$$D_{\vec{n}} = \frac{\delta S_D}{\delta S} \quad (1)$$

در صورتی که پارامتر آسیب به بردار نرمال  $\vec{n}$  وابسته نباشد و به صورت همسانگرد در نظر گرفته شود، می‌توان نوشت:

$$D = \frac{\delta S_D}{\delta S} \quad (2)$$

از رابطه (۲) معلوم است که مقدار  $D$  همواره بین صفر و یک می‌باشد،  $D = 0$  مربوط به ماده بدون آسیب یا به اصطلاح بکر و  $D = 1$  مربوط به ماده گسیخته شده است. برای بسیاری از مواد یک مقدار بحرانی برای پارامتر آسیب وجود دارد که ماده را در آستانه گسیختگی قرار می‌دهد [۱].



شکل ۶- مفهوم پارامتر آسیب [۱]

تنش موثر یکی از اساسی‌ترین مفاهیم در مکانیک آسیب است. در صورتیکه المان حجمک نماینده تحت نیروی  $F$  باشد تنش تک محوره برابر است با:

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (3)$$

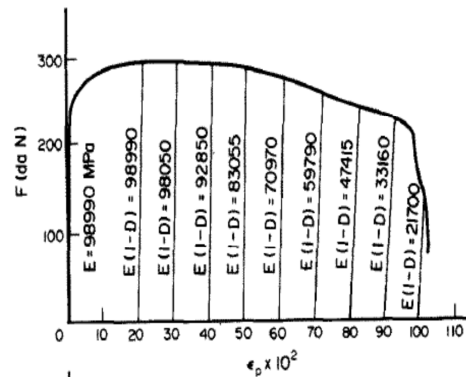
که  $S$  سطح مقطع المان اولیه است. هم‌چنین در هنگام بارگذاری در صورتیکه حفره‌ها باز باشد، نیرویی توسط حفره‌ها تحمل نمی‌شود و بار توسط سطح  $S - S_D$  تحمل می‌گردد و لذا تنش مؤثر اینگونه تعریف می‌شود:

$$\tilde{\sigma} = \frac{F}{S - S_D} \quad (4)$$

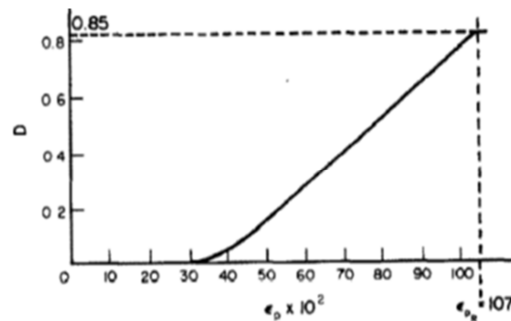
با توجه به تعریف پارامتر آسیب، رابطه قبل به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\tilde{\sigma} = \frac{F}{S(1 - \frac{S_D}{S})} \rightarrow \tilde{\sigma} = \frac{\sigma}{1 - D} \quad (5)$$

شکل‌های ۴ و ۵ مثالی از اندازه‌گیری آسیب نرم با استفاده از آزمون مدول الاستیک برای مس را نشان داده شده‌اند [۱].



شکل ۴- تغییرات مدول الاستیسیته تا لحظه شکست برای مس [۱]



شکل ۵- نمودار روند رشد آسیب در مس [۱]

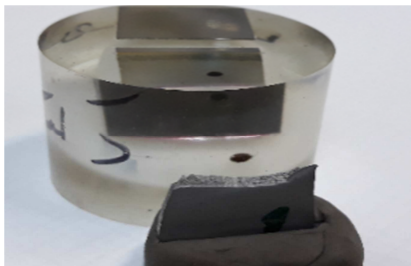
در جدول ۱ روش‌های مختلف آزمایشگاهی جهت تعیین پارامتر آسیب و نیز درجه دقت هر یک از این موارد مشخص شده است [۱]. لازم به ذکر است که در این جدول تعداد ستاره‌ها به مفهوم کیفیت خوب روش اندازه‌گیری پارامتر آسیب می‌باشد. بنابراین با توجه به موارد بیان شده آزمایش مدول الاستیسیته و ریزسختی بهترین روش برای آسیب نرم و روش‌های میکروگرافی، تغییرات چگالی، امواج آلتراسونیک و مقاومت الکتریکی در درجه دوم اهمیت می‌باشند.

جدول ۱- روش‌های ارزیابی آسیب [۱]

روش	آسیب ترد	آسیب نرم
تصاویر ریزنگاری	*	**
تغییرات چگالی	-	*
مدول الاستیک	**	***
آلتراسونیک	***	**
بارگذاری خستگی	-	*
پاسخ خزش	-	*
سختی سنجی	**	***
پتانسیل الکتریکی	*	**

جدول ۲- ترکیب شیمیایی فولاد 316L

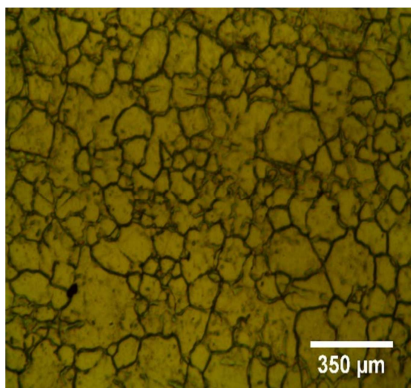
درصد	ترکیب شیمیایی
۰/۰۳۸	کربن
۱/۵۴	منگنز
۰/۰۳۴	فسفر
۰/۰۰۴	گوگرد
۰/۴۶	سیلیسیم
۱۷/۴۵	کروم
۹/۷۵	نیکل
۰/۴۵	نیتروژن
۶۶/۱	آهن
۰/۴۵	مولیبدن



شکل ۷- نمونه اچ شده از سطح نمونه و نیز سطح مقطع شکست



شکل ۸- میکروسکوپ نیکون استفاده شده جهت تصویربرداری متالوگرافی از نمونه



شکل ۹- نتیجه آزمایش متالوگرافی بر روی نمونه فولاد ضد زنگ 316L

### ۳-۲- روش اندازه گیری سرعت انتشار امواج آلتراسونیک

در یک محیط با خواص همسانگرد و الاستیک خطی، سرعت انتشار امواج طولی در یک ماده اولیه بدون آسیب  $V_L$  به صورت زیر محاسبه می‌گردد [۱]:

$$V_L^2 = \frac{E}{\rho} \frac{1 - \nu}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \quad (6)$$

که در آن  $E$  مدول الاستیسیته،  $\rho$  چگالی و  $\nu$  ضریب پواسون مربوط به ماده می‌باشد. محاسبه سرعت امواج طولی در یک ماده آسیب‌دیده  $\bar{V}_L$  عبارت است از:

$$\bar{V}_L^2 = \frac{\bar{E}}{\bar{\rho}} \frac{1 - \nu}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \quad (7)$$

$$D = 1 - \frac{\bar{E}}{E} = 1 - \frac{\bar{\rho} \bar{V}_L^2}{\rho V_L^2} \quad (8)$$

$D$  پارامتر آسیب،  $E$  مدول الاستیک ماده بدون آسیب و  $\bar{E}$  مدول الاستیک ماده آسیب دیده است. با فرض تغییرات بسیار کم چگالی،  $\rho$  چگالی ماده اولیه و  $\bar{\rho}$  چگالی ماده آسیب دیده تقریباً با هم برابر بوده و در نتیجه رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$D = 1 - \frac{\bar{V}_L^2}{V_L^2} \quad (9)$$

### ۴-۲- روش تغییرات مدول الاستیسیته

با استفاده از اصل کرنش معادل، اندازه‌گیری آسیب را می‌توان با استفاده از تغییرات مدول الاستیسیته محاسبه نمود [۱]:

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma}{1 - D} \quad (10)$$

$$\varepsilon_e = \frac{\bar{\sigma}}{E} = \frac{\sigma}{E(1 - D)}$$

$$\bar{E} = E(1 - D) \rightarrow D = 1 - \frac{\bar{E}}{E}$$

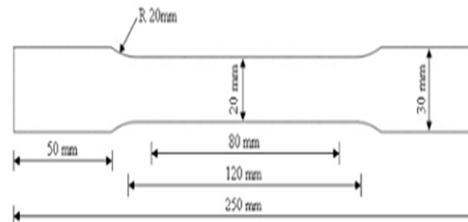
### ۳- نتایج تجربی

#### ۱-۳- ماده مورد استفاده

فولاد آلیاژی 316L از نوع فولادهای آستنیتی زنگ نزن است که شامل ۲ تا ۳ درصد مولیبدن می‌باشد و این افزودنی مقاومت به خوردگی را بالا برده و استحکام در دماهای بالا را افزایش می‌دهد. ترکیب شیمیایی این نوع فولاد مطابق جدول ۲ می‌باشد. آنالیز شیمیایی و ساختار دانه‌بندی این ماده با استفاده از آزمون کوانتومتری و متالوگرافی در آزمایشگاه محصول شرکت فولاد مبارکه به دست آمد. برای آماده‌سازی نمونه دو سری عملیات لازم است انجام گیرد: اول یک سری عملیات فیزیکی از قبیل تمیزکاری و صیقل دادن سطح فلز و سپس یک سری عملیات شیمیایی مثل اچ کردن که مرز دانه‌ها را واضح‌تر می‌کند. شکل-های ۷ تا ۹ نمونه اچ شده، تصویر میکروسکوپ نوری مورد استفاده و همچنین نتیجه آزمایش متالوگرافی ساختار دانه‌بندی ماده را نشان می‌دهد.

### ۲-۳- آزمون کشش استاندارد

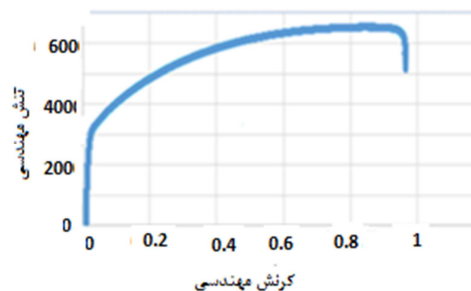
در این تحقیق به منظور بررسی تغییرات آسیب در مراحل مختلف تغییرشکل، مطابق شکل ۱۰، آزمون کشش بر روی چند نمونه استاندارد از ورق فولاد ضد زنگ 316L به ضخامت دو میلی‌متر انجام گردید. نمونه استاندارد تهیه شده در دستگاه آزمون کشش، کشیده می‌شود تا شکست در قطعه رخ دهد. آزمون کشش برای سه نمونه با سرعت یک میلی‌متر بر دقیقه انجام گرفت. شکل ۱۱ نمونه در لحظه شکست و هم‌چنین شکل ۱۲ نمودار تنش-کرنش مهندسی ماده را نمایش می‌دهد.



شکل ۱۰- نمونه استاندارد تهیه شده از فولاد ضد زنگ 316L [۲۰]



شکل ۱۱- نمونه استاندارد تهیه شده از فولاد ضد زنگ 316L در آزمون کشش حین شکست

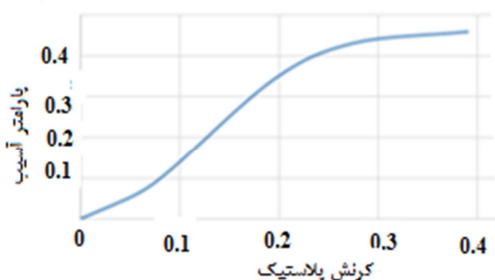


شکل ۱۲- نمودار تنش-کرنش مهندسی برای فولاد ضد زنگ 316L

### ۳-۳- آزمون آلتراسونیک

برای محاسبه پارامتر آسیب با استفاده از روش آلتراسونیک لازم است که سرعت موج در مراحل مختلف نمونه تحت آزمایش کشش تک محوره محاسبه گردد. روش انجام کار به این صورت است که ابتدا یک نمونه تخت آزمایشگاهی از فولاد زنگ نزن 316L مطابق شکل ۱۰ آماده نموده و آزمون کشش بر روی آن انجام می‌گردد. با معلوم بودن نتیجه آزمون (مطابق شکل ۱۲) نمودار تنش-کرنش مهندسی از تنش تسلیم تا مقدار تنش نهایی، به چند بازه تقسیم می‌شود. حال بر روی سایر نمونه‌ها آزمون کشش به‌گونه‌ای انجام می‌گردد که هنگامی که تنش به مقدارهای مشخص شده از قبل برسد دستگاه متوقف شده و سرعت موج اندازه‌گیری شود. این مراحل ادامه می‌یابد تا نمونه گسیخته گردد. حال با استفاده از رابطه ۹ و با دانستن مقدار سرعت موج، مقدار آسیب در کرنش‌های پلاستیک مشخص شده تعیین می‌گردد.

در شکل ۱۳ نمودار تغییرات آسیب در کرنش‌های پلاستیک مختلف محاسبه شده از این روش نشان داده شده است. مطابق شکل، حد نهایی مقدار متغیر آسیب یعنی پارامتر آسیب بحرانی برای ماده از این روش ۰/۴۶ تخمین زده می‌شود.



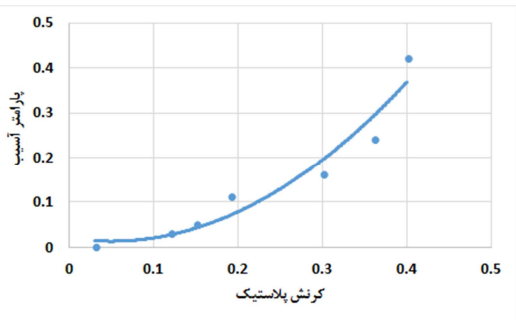
شکل ۱۳- نمودار پارامتر آسیب بر حسب کرنش پلاستیک

### ۳-۴- آزمون مدول الاستیک

برای یافتن مقدار مدول الاستیسیته، لازم است که عملیات بارگذاری و باربرداری به‌صورت متوالی انجام گیرد. همچنین آزمایش‌های مکرر نشان می‌دهد که دقت نتایج در مرحله باربرداری بیشتر می‌باشد. برای اندازه‌گیری مدول الاستیسیته با دقت بالا نیاز به اندازه‌گیری کرنش‌های کوچک می‌باشد. روش کار به این صورت است که ابتدا یک نمونه آزمایشگاهی از فولاد زنگ نزن 316L مطابق شکل ۱۰ آماده می‌شود و آزمون کشش بر روی آن انجام می‌پذیرد. با معلوم بودن نتیجه آزمون، محدوده تنش تسلیم تا مقدار تنش نهایی به چند بازه تقسیم می‌گردد. حال بر روی نمونه دوم آزمون کشش به‌گونه‌ای انجام می‌گردد که با رسیدن تنش به مقدارهای مشخص شده از قبل، دستگاه متوقف گردیده و عملیات باربرداری تا یک محدوده مشخص صورت پذیرد (مطابق شکل ۱۴). با توقف دستگاه در هر مرحله، مقدار ضخامت نمونه و عرض نمونه با استفاده از میکرومتر محاسبه می‌شود. این مراحل تا شکست ماده ادامه می‌یابد. حال با معلوم بودن مقادیر سطح مقطع، کرنش‌های پلاستیک در هر سیکل محاسبه می‌شود. با توجه به معادلات پلاستیسیته و اصل حجم ثابت می‌توان نوشت:

(۱۱)





شکل ۱۷- نمودار تغییرات پارامتر آسیب بر حسب کرنش پلاستیک

همان گونه که در شکل ۱۶ مشاهده می گردد، مقدار مدول الاستیک در طول انجام آزمایش کاهش پیدا نموده و در نهایت در مقدار ۱۲۲ گیگاپاسکال شکست رخ می دهد. با استفاده از شکل ۱۷، حد نهایی مقدار متغیر آسیب یعنی پارامتر آسیب بحرانی برای ماده از این روش  $0.42$  تخمین زده می شود که تطابق مناسبی با مقدار تخمینی از روش آلتراسونیک از خود نشان می دهد.

#### ۴- نتیجه گیری

در این مقاله با استفاده از آزمایش مدول الاستیک و نیز آزمایش آلتراسونیک پارامتر آسیب بحرانی برای فولاد ضد زنگ 316L محاسبه شد. همچنین لازم به ذکر است، پارامتر آسیب در هر لحظه از کرنش پلاستیک محاسبه گردید که این کار با انجام آزمون کشش به همراه بارگذاری و باربرداریهای متناوب بر روی نمونه استاندارد صورت پذیرفت. به علاوه، مقدار پارامتر آسیب در کرنش شکست برای فولاد ضد زنگ 316L از روش مدول الاستیک و از روش آزمون آلتراسونیک به دست آمد که دو روش تطابق مناسبی از خود نشان دادند. البته باید به این نکته توجه نمود که پارامترهای به دست آمده برای نمونه های تخت در شرایط نرخ کرنش یک میلیمتر بر دقیقه و در دمای محیط حاصل گردیده و برای چنین شرایطی معتبر هستند. در صورتی که این موارد تغییر نماید پارامترها نیز عوض شده و لازم است آزمایشها مطابق با شرایط جدید تکرار گردند.

#### ۵- مراجع

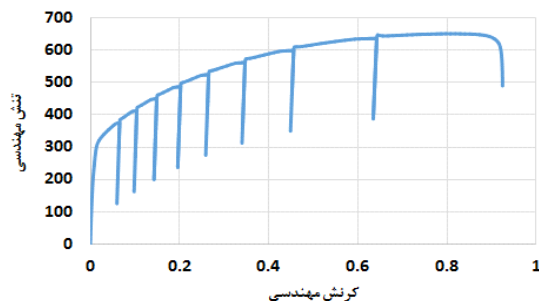
- [1] Lemaitre J., A course on damage Mechanics, Springer – Verlag, Germany, 1992.
- [2] Lemaitre J., Handbook of materials behavior models, Wiley, USA, 2002.
- [3] McClintock F.A., A criterion of ductile fracture by the growth of holes. J. Appl. Mech., 1968.
- [4] Rice J.R., Tracey D. M., On the ductile enlargement of voids in triaxial stress fields. J. Mech. Phys. Solids, 1969.
- [5] Gurson A., Continuum theory of ductile rupture by void nucleation and growth, part i –Yield criteria and flow rules for porous ductile media. J. Eng. Mat. Tech., 1977.
- [6] Chu C.C. and Needleman A., Void nucleation effects in biaxially stretched sheets. J. Eng. Mat. Tech. 102(3): pp. 240-256. 1980.
- [7] Tvergaard V. and Needleman A., Analysis of the cup-cone fracture in a round tensile bar. Acta Metallurgica 32(1): pp. 157-169, 1984.

$$v_0 = v \rightarrow A_0 L_0 = AL \rightarrow \frac{L}{L_0} = \frac{A_0}{A}$$

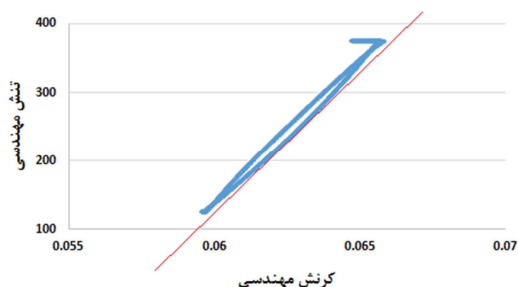
$$\varepsilon = \ln\left(\frac{L}{L_0}\right) = \ln\left(\frac{A_0}{A}\right) \rightarrow \varepsilon_p = \varepsilon - \varepsilon_e$$

که در این روابط  $v$  و  $v_0$  به ترتیب حجم جاری نمونه و حجم اولیه می باشند. همچنین  $A, A_0, L$  و  $L_0$  به ترتیب سطح جاری، سطح مقطع اولیه، طول جاری و طول اولیه نمونه می باشند.

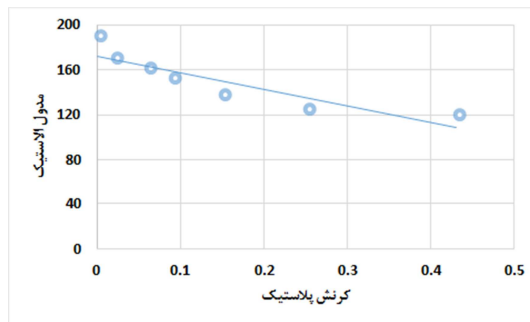
برای محاسبه مدول الاستیک نیز در هر مرحله از باربرداری با انجام برازش خطی، شیب نمودار مطابق شکل ۱۵ محاسبه می شود. در نهایت مطابق رابطه ۱۰ مقدار پارامتر آسیب در هر لحظه از کرنش پلاستیک محاسبه گردیده و در یک مقدار بحرانی شکست رخ می دهد. شکل ۱۶ نمودار تغییرات مدول الاستیک در کرنش های مختلف پلاستیک و شکل ۱۷ نمودار تغییرات پارامتر آسیب در هر لحظه از کرنش پلاستیک را نشان می دهد.



شکل ۱۴- نمودار تنش - کرنش مهندسی در حالت بارگذاری و باربرداری



شکل ۱۵- جزییات نمودار باربرداری الاستیک با انجام برازش خطی جهت اندازه گیری مدول الاستیک



شکل ۱۶- نمودار تغییرات مدول الاستیک بر حسب کرنش پلاستیک

- [8] Leblond J.B., Perrin G., and Devaux J., An improved Gurson-type model for hardenable ductile metals. *Eur. J. Mech. Solids* 14(4): pp. 499-527, 1995.
- [9] Gologanu M., Leblond J.B. and Devaux J., Approximate models for ductile metals containing nonspherical voids—case of axisymmetrical prolate ellipsoidal cavities. *J. Mech. Phys. Solids* 41(11): pp. 1723-1754, 1993.
- [10] Garajeu M., Michel J.C., and Suquet P., A micromechanical approach of damage in viscoplastic materials by evolution in size, shape and distribution of voids. *Comp. Meth. Appl. Mech. Eng.* 183(3-4): pp. 223-246, 2000.
- [11] Pardoen T. and Hutchinson J.W., An extended model for void growth and coalescence. *J. Mech. Phys. Solids* 48(12): pp. 2467-2512, 2000.
- [12] Clausen, D.P. (1970). Effect of plastic strain rate on ductility and toughness. *Int. J. Frac. Mech.* 6(1): p. 71-85.
- [13] Hancock J.W., Mackenzie A.C. On the mechanisms of ductile failure in high-strength steels subjected to multi-axial stress-states. *J. Mech. Phys. Solids* 1976;
- [14] Hancock J.W., Brown D.K. On the role of strain and stress state in ductile failure. *J. Mech. Phys. Solids* 1983.
- [15] Johnson G.R., Cook W.H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures. *Eng. Frac. Mech.* 1985.
- [16] Bonara N., Ruggiero D., Gentile D., De Meo S., Practical Applicability and Limitations of the elastic Modulus Degradations Technique for damage Measurements in Ductile Metals. *J. Strain* 47(3), pp.241-254, 2011.
- [17] Guelorget B., Francoice M., Lu J., Micro-indentation as a Local Damage Measurement Technique. *Mat. Letters* 61(1), pp.34-36, 2007.
- [18] Lemaitre, J. Dufailly, J., Damage measurements, *Eng. Frac. Mech.*, Vol. 28 pp.643-661, 1987.
- [19] chaboche J.L., Lesne P.M., Anon – Linear continuous fatigue damage model, *Fat. Frac. Eng. Mat. Struc.* , Vol.11 , pp. 1 – 17 , 1988.
- [20] Haji Aboutalebi F., Farzin M., Poursina M., Numerical simulation and experimental validation of a ductile damage model for DIN 1623 st14 steel". *Int. J. Adv. Man. Tech.* 53: pp. 157-165, 2011.