

Investigation of the Similarity Between the Small Punch Test as a Pseudo-Non-Destructive Method and Uniaxial Fatigue Testing in SS304 Stainless Steel

Hassan Mirahmadi¹  | Nasser Soltani² 

1. Department of Mechanical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: h.mirahmadi@ut.ac.ir
2. Department of Mechanical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: nsoltani@ut.ac.ir

Article Information:

Research Article

Received 28 Sep. 2025

Revised 10 Feb. 2026

Accepted 19 Feb. 2026

Keywords:

Small Punch Test,
Uniaxial Fatigue Test,
Fatigue Properties,
Pseudo-Non-Destructive
Method,
SS304 Stainless Steel.

ABSTRACT

Determining the mechanical properties of materials, including fatigue properties used in structural components often presents challenges due to limitations in specimen extraction and the necessity of avoiding damage to in-service parts, especially in existing, safety-critical engineering components. To address these constraints, small-specimen testing techniques have gained considerable attention in recent years, with the Small Punch Test being one of the most prominent methods. This study aims to evaluate the similarity between the small punch fatigue test and the conventional uniaxial fatigue test in SS304 stainless steel as a pseudo-non-destructive method for potential structural integrity assessment applications. For this purpose, the small punch fatigue test response was analyzed in terms of the load–cycle relationship, hysteresis energy evolution, and specimen morphology after fatigue testing. SS304 specimens were prepared in accordance with the European standard CWA 15627:2006 and subjected to various cyclic loading levels. Post-test examinations revealed distinct beach marks on the fracture surfaces, clearly indicating fatigue crack growth under cyclic loading. The load–cycle curves obtained from the small punch fatigue test exhibited a power-law trend ($F_{\max}=3.415 \times 10^5 \times N_f^{-0.554}$, $R^2=0.96$), comparable to the stress–cycle curves typically observed in standard uniaxial fatigue tests. Additionally, the hysteresis loop energy increased with the number of cycles, and its relationship with the number of cycles followed a power-law form ($R^2>0.81$). The strong correlation between the fatigue behavior measured using the small punch fatigue test and that obtained from conventional uniaxial fatigue testing indicates that the small punch fatigue test can serve as an effective method for fatigue property evaluation of materials used in structures.

Cite this article: Mirahmadi, H. & Soltani, N. (2025). Investigation of the Similarity Between the Small Punch Test as a Pseudo-Non-Destructive Method and Uniaxial Fatigue Testing in SS304 Stainless Steel. *Journal of Nondestructive Testing Technology*, 4 (2), 65-73.



© The Author(s).

DOI: <http://doi.org/10.30494/jndt.2026.544159.1168>

Publisher: Iranian Society for Nondestructive Testing

بررسی مشابهت آزمون پانچ کوچک به عنوان یک روش شبه غیرمخرب و آزمون خستگی

تک‌محوری در فولاد SS304

حسن میراحمدی^۱ | ناصر سلطانی^۲۱. دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران، رایانامه: h.mirahmadi@ut.ac.ir۲. دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران، رایانامه: nsoltani@ut.ac.ir

چکیده:

به منظور تعیین خواص مکانیکی از جمله خواص خستگی برای مواد به کاررفته در سازه‌ها، استفاده از روش‌های مبتنی بر آزمون نمونه‌های کوچک، با توجه به محدودیت‌های نمونه‌برداری و ضرورت پرهیز از تخریب قطعه‌ی اصلی، به شدت مورد توجه قرار گرفته است. در میان این روش‌ها، آزمون پانچ کوچک به عنوان یکی از روش‌های شاخص مطرح می‌باشد. در این پژوهش هدف بررسی مشابهت آزمون خستگی پانچ کوچک با آزمون خستگی تک‌محوری در فولاد زنگ نزن SS304 به عنوان یک روش شبیه‌غیرمخرب می‌باشد. به همین منظور رفتار آزمون خستگی پانچ کوچک از منظر نمودار نیرو برحسب تعداد سیکل تا شکست، انرژی هیستریزس و شکل نمونه پس از آزمون خستگی مورد مطالعه قرار گرفت. پس از آماده‌سازی نمونه‌های آزمون پانچ کوچک مطابق با استاندارد اروپایی با کد CWA 15627:2006 این نمونه‌ها در سطوح بارگذاری مختلف مورد آزمون قرار گرفت. در نمونه‌های آزمون پانچ کوچک پس از اعمال بارگذاری خستگی خطوط ساحلی ناشی از رشد ترک خستگی در این آزمون به وضوح مشاهده شد. همچنین نمودار نیرو برحسب تعداد سیکل تا شکست به صورت توانی بوده شد. نتایج این مجموعه آزمون‌ها نشان‌دهنده مشابهت رفتار آزمون پانچ کوچک خستگی با آزمون تک‌محوری است. به علاوه در طول آزمون با افزایش تعداد سیکل بارگذاری انرژی حلقه هیستریزس افزایش پیدا کرده و رابطه آن با تعداد سیکل به صورت توانی می‌باشد ($R^2 > 0.81$). نتایج این مجموعه آزمون‌ها نشان‌دهنده مشابهت رفتار آزمون پانچ کوچک خستگی با آزمون تک‌محوری است. از این رو انتظار می‌رود آزمون خستگی پانچ کوچک به عنوان یک روش کارآمد در ارزیابی خواص خستگی مواد به کار رفته در سازه‌ها مورد استفاده قرار گیرد.

اطلاعات مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:

۱۴۰۴/۰۷/۰۶

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۴/۱۱/۲۱

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۴/۱۱/۳۰

کلیدواژگان:

آزمون پانچ کوچک،

آزمون خستگی تک‌محوری،

خواص خستگی،

روش شبه‌غیرمخرب،

فولاد زنگ‌نزن SS304

استناد: میراحمدی، حسن و سلطانی، ناصر. (۱۴۰۴). بررسی مشابهت آزمون پانچ کوچک به عنوان یک روش شبه غیرمخرب و آزمون خستگی تک‌محوری در فولاد SS304. *مجله فناوری آزمون‌های غیرمخرب*، ۴ (۲)، ۶۵-۷۳.

© نویسندگان

ناشر: انجمن آزمون‌های غیرمخرب ایران

DOI: <http://doi.org/10.30494/jndt.2026.544159.1168>

۱- مقدمه

اصلی این روش‌ها ارزانی و سادگی کاربرد آن‌ها می‌باشد. با این وجود، این روش‌ها با توجه به نبود سابقه‌ی کافی از بارگذاری‌های قطعه، شرایط کاری آن، پیچیدگی رفتار مواد و نقصان اطلاعات از مشخصات ماده اولیه و از طرفی تقریبی بودن مدل‌های ارزیابی عمر، از دقت لازم برخوردار نمی‌باشند. به همین جهت از این روش‌ها بیشتر در برآورد اولیه عمر کارکرد قطعه در حین طراحی استفاده می‌شود. سه روش مهم تعیین عمر خستگی که در محاسبات کاربرد دارد عبارت است از: روش تنش عمر، روش کرنش عمر و روش مکانیک شکست.

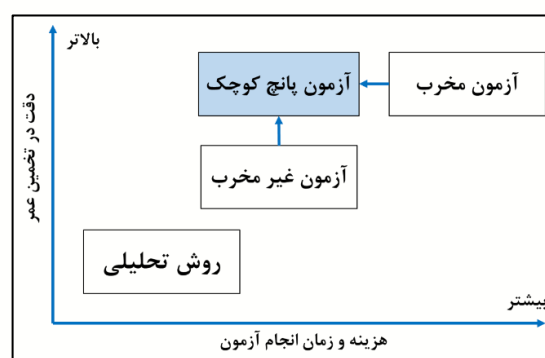
در مورد آزمون‌های مکانیکی هرکدام از دو گروه آزمون‌های مخرب و غیرمخرب دارای مزایا و معایبی می‌باشند. آزمون‌های مخرب نتایج واقعی از شرایط کنونی قطعه را ارائه می‌دهند، هم‌چنین این آزمون‌ها از آنجاکه مستقیماً قادر به ارزیابی وضعیت ماده می‌باشند، خطاهای ناشی از فقدان اطلاعات مربوط به خواص ماده پس از آسیب را حذف کرده و دقیق‌ترین نوع ارزیابی را انجام می‌دهند. عمر مصرف‌شده را اغلب می‌توان با جدا کردن نمونه‌هایی از قطعه و انجام آزمون‌های تسریع شده در آزمایشگاه تخمین زد. در آزمون‌های مخرب لازم است جهت تهیه نمونه استاندارد، مقدار قابل توجهی ماده از قطعه جدا شود، بنابراین قطعه مورد بررسی دیگر قابل استفاده نبوده و باید از این نتایج برای قطعات مشابه استفاده نمود که این موضوع در برخی مواقع هزینه بالایی را تحمیل می‌کند. از سوی دیگر ضرورت دارد که در این روش‌ها ماده جداشده نماینده بخش بحرانی قطعه باشد اما تشخیص قسمت بحرانی قطعه اغلب با روش‌های غیرمخرب و محاسباتی صورت می‌گیرد که با عدم اطمینان همراه می‌باشد.

در آزمون‌های غیرمخرب، قطعه سالم باقی می‌ماند، به همین دلیل این آزمون‌ها بسیار مورد توجه می‌باشد. معمولاً از روش‌های غیرمخرب جهت اندازه‌گیری‌های ابعادی عیوب استفاده می‌شود و سپس داده‌های مربوط به نوع، اندازه و موقعیت عیوب می‌توانند جهت اندازه‌گیری عمر باقیمانده مورد استفاده قرار گیرد.

با توجه محدودیت مهندسان در نمونه‌برداری از قطعات در حال کار و مزایای انجام آزمایش بر روی این قطعات بدون تخریب قطعه، مطالعات بر روی یافتن خواص

تعیین خواص مکانیکی مواد به‌کاررفته در سازه‌ها به‌منظور توسعه مواد، بررسی کارکرد صحیح و ارزیابی عمر باقیمانده بسیار حیاتی می‌باشد. در همین زمینه تکنیک‌های استفاده از نمونه کوچک آزمون¹ (SST) به سه دلیل نسبت به آزمون‌های مرسوم ترجیح داده می‌شود: اول در مواردی که مقدار ماده در دسترس محدود می‌باشد، دوم زمانی که ارزیابی محلی در نقطه‌ای کوچک از قطعه مد نظر باشد و سوم در مواردی که به کار بردن مواد در حجم بالا مشکل می‌باشد، مانند زمانی که ماده خاصیت رادیواکتیو دارد. تکنیک‌های آزمایش نمونه‌های کوچک نویددهنده ارزیابی سلامت سازه و ارزیابی عمر باقیمانده قطعات در حال سرویس‌دهی می‌باشد، چراکه این روش‌ها به‌راحتی قابل اجرا بوده و بسیار نزدیک به روش‌های غیرمخرب می‌باشد. از جمله مطرح‌ترین تکنیک‌های انجام آزمون نمونه‌های کوچک، روش آزمون پانچ کوچک می‌باشد.

در یک تقسیم‌بندی کلی (شکل ۱) روش‌های ارزیابی عمر را می‌توان به دو دسته اصلی یعنی روش‌های محاسباتی و روش‌های انجام آزمون مکانیکی تقسیم کرد. در این تقسیم‌بندی آزمون‌های مکانیکی خود نیز به دو گروه مخرب و غیرمخرب تفکیک می‌شوند.



شکل ۱) تقسیم‌بندی کلی روش‌های ارزیابی عمر

در روش محاسباتی با استفاده از تاریخچه‌ی بهره‌برداری و اطلاعات مواد استفاده‌شده در کنار نظریه‌های موجود در زمینه‌ی بررسی آسیب‌های مختلف، عمر مصرفی محاسبه‌شده و عمر باقیمانده تخمین زده می‌شود. ویژگی

¹ Small Specimen Test Technique

است که استاندارد اروپایی (EUCOP¹) برای اولین بار در سال ۲۰۰۶، توضیحات دستگاه آزمون، فرآیند، آماده‌سازی نمونه و پیشنهادهای لازم برای تخمین مشخصه‌های کشش، خزش و شکست را چاپ کرد. این استاندارد در سال ۲۰۰۷ مورد بازنگری قرار گرفت [۱۸ و ۱۹].

نتایج آزمون پانچ کوچک به‌طور مستقیم قابل گزارش نیست بلکه لازم است این نتایج به‌عنوان داده‌های خامی توسط روش‌های تحلیلی و تجربی پردازش شوند تا امکان برقراری رابطه‌ای بین این نتایج و نتایج آزمون‌های مرسوم در ابعاد واقعی فراهم شود در این زمینه پژوهشگران بسیاری روش‌های متعددی جهت برقراری این ارتباط توسعه داده‌اند [۲۰-۲۳].

با توجه به رفتار پیچیده‌تر خستگی نسبت به کشش و خزش تاکنون در خصوص بررسی رفتار نمونه پانچ کوچک به بارگذاری چرخه‌ای تاکنون مطالعات محدودی انجام گرفته است.

پارکاش و همکاران [۲۴] با استفاده از یک سری آزمایش که تحت نسبت بار فشاری یا نسبت بار $R > 0$ انجام شد، یک چیدمان بارگذاری چرخه‌ای متناسب با ابعاد نمونه آزمون پانچ کوچک طراحی کردند. لنکستر و همکاران [۲۳] رفتار آزمون پانچ کوچک خستگی آلیاژ تیتانیوم-Ti-6Al-4V در بارگذاری نیرو کنترل را، با داده‌های خستگی تک‌محوری مرتبط ساختند و منحنی‌های نیرو براساس تعداد سیکل را با استفاده از آزمون پانچ کوچک تعیین کردند. لوئیس و همکاران [۲۵] خواص خستگی مواد ساخته شده با روش افزایشی را در دمای اتاق از طریق آزمون‌های پانچ کوچک خستگی مورد بررسی قرار دادند.

ژائو و همکاران [۲۶] به مطالعه رفتار خستگی آلیاژ Hastelloy X در دمای بالا از جمله تغییرات انرژی هیستریزیس با استفاده از آزمون خستگی پانچ کوچک پرداخته‌اند و نشان داده‌اند که این آزمون به‌ویژه در شرایطی که نمونه‌های بزرگ قابل دسترس نیستند، ابزاری مفید برای ارزیابی خواص مکانیکی مواد در دماهای بالا محسوب می‌شود.

ژانگ^۲ و همکاران [۲۷] به بررسی خواص مکانیکی نمونه‌های

مکانیکی با استفاده از نمونه‌های آزمون کوچک متمرکز شد. این روش‌ها در واقع نوعی آزمون مخرب می‌باشند، یعنی به نمونه‌برداری از قطعه نیاز دارند اما نمونه‌های آزمون دارای ابعاد بسیار کوچک است، بنابراین جداسازی آن‌ها اثر کوچک و در بسیاری از موارد غیر تخریبی بر روی قطعه می‌گذارد.

استفاده از نمونه‌های کوچک آزمون به زمینه‌ی ارزیابی عمر قطعات محدود نمی‌شود. به طور کلی کاربردهای این نمونه‌های آزمایش به سه دسته تقسیم می‌شود:

۱. در مواقعی که مقدار ماده در دسترسی محدود می‌باشد؛ مانند ارزیابی قطعه در حین کار، ارزیابی خواص مواد جدید در طول فرآیند نمونه سازی و ارزیابی مواد مورد استفاده در تکنولوژی ساخت مواد افزودنی (AM).

۲. مواقعی که ارزیابی محلی خواص مکانیکی در قطعات لازم باشد.

۳. مواقعی که آزمایش مقدار زیاد ماده مشکل‌زاست؛ مانند مواد رادیواکتیو.

اولین بار در سال ۱۹۸۱ میلادی، ماناهان و همکاران [۱] از آزمون پانچ کوچک برای اندازه‌گیری تغییر خواص مکانیکی مواد بعد از کارکرد در معرض تشعشعات هسته‌ای استفاده نمودند. این روش در ابتدا به‌منظور بررسی اثرات تشعشعات اتمی در نیروگاه‌های اتمی توسعه پیدا کرد [۶-۲]. بررسی تردشدگی بین‌دانه‌ای در فولادهای آلیاژی [۷]، اندازه‌گیری تغییرات چقرمگی شکست [۸ و ۹]، اندازه‌گیری مدول الاستیسیته‌ی سیمان‌های بکار رفته در ساخت استخوان [۱۰]، بررسی تغییرات دمای تردشدگی در فولادهای مخازن تحت‌فشار قبل و بعد از کارکرد در معرض تشعشعات هسته‌ای [۱۱]، تخمین میزان چکش‌خواری آلیاژ فولاد-آلومینیوم [۱۲]، بخش کوچکی از استفاده از آزمون پانچ کوچک در زمینه‌های گوناگون می‌باشد. همچنین اخیراً روش اجزا محدود و شبکه عصبی جهت تعیین خواص کششی در آزمون پانچ کوچک مورد استفاده قرار گرفته است [۱۳-۱۵].

اما به‌صورت ویژه روش پانچ کوچک جهت پیدا کردن خواص مکانیکی مواد نظیر کشش، خزش، خستگی، شکست و غیره گسترش داده شده است [۱۳، ۱۶، ۱۷]. لازم به یادآوری

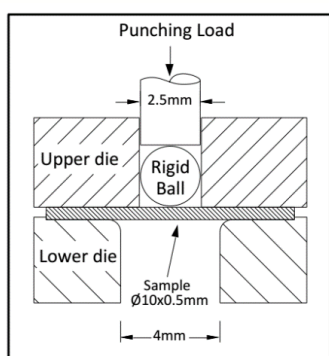
¹ European code of Practice

² Zhang

به‌عنوان یک روش شبه غیرمخرب در ارزیابی عمر خستگی، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

۲- چیدمان آزمون

نمونه‌های آزمایش پانچ کوچک به‌صورت دیسک‌هایی با قطر 10 mm و ضخامت 0.5 mm که مطابق با استاندارد اروپایی با کد CWA 15627:2006 [۱۹] آماده‌سازی شده‌اند، در نظر گرفته می‌شود. چیدمان این آزمون در شکل ۲ و شکل ۳ نشان داده شده است. نمونه آزمایش به‌وسیله دو قطعه استوانه‌ای شکل در جای خود مهار شده است. در قطعه بالایی سوراخی به قطر 2.5 mm برای عبور پانچ و گوی بارگذاری و در قطعه پایینی سوراخی به قطر 8 mm برای تغییر شکل نمونه تعبیه شده است. ضمناً به‌منظور قرار گرفتن دقیق نمونه در مرکز استوانه، شیاری در قطعه پایین در نظر گرفته شد. نمونه پس از قرار گرفتن بین این دو قطعه استوانه‌ای، توسط دستگاه Gotech دارای لودسل 1 kN تحت بارگذاری یکنواخت و یا چرخه‌ای قرار می‌گیرد.



شکل ۲) شماتیک نمونه آزمون و چیدمان آزمون پانچ کوچک



شکل ۳) چیدمان آزمون پانچ کوچک در دستگاه خستگی

کوچک فولادی با استفاده از آزمون پانچ کوچک پرداخته‌اند که نشان‌دهنده توانایی این آزمون در شبیه‌سازی رفتار مواد در مقیاس کوچک است. همچنین، در پژوهش نوویک^۱ و همکاران [۲۸]، اثرات آزمون پانچ کوچک در آلیاژهای تقویت‌شده با اکسید در شرایط مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته و روش‌های شبیه‌سازی عددی برای تحلیل نتایج ارائه شده است. در همین راستا، اوترو^۲ و همکاران [۲۹] با استفاده از روش پانچ کوچک، ویژگی‌های خستگی فولادهای ساختاری را بررسی کرده و به توسعه متدولوژی جدیدی برای ارزیابی این خواص پرداخته‌اند. علاوه بر این، کیم^۳ و همکاران [۳۰] با معرفی روش آزمون خستگی پانچ کوچک بر اساس شبیه‌سازی‌های عددی، تلاش کردند تا دقت ارزیابی‌های خستگی را در مواد مختلف افزایش دهند. این مطالعات نشان‌دهنده روند رو به رشد استفاده از آزمون پانچ کوچک در ارزیابی خواص مکانیکی و خستگی مواد است و می‌تواند به عنوان پایه‌ای برای توسعه روش‌های شبه‌غیرمخرب در ارزیابی عمر مواد مورد استفاده قرار گیرد.

همانطور که گفته شد آزمون پانچ کوچک به دلیل مزایای خاص خود، از جمله ویژگی غیرمخرب بودن، پیش‌تر در استانداردها به‌عنوان روشی برای ارزیابی خواص مختلف مواد نظیر استحکام تسلیم، استحکام نهایی و خزش معرفی شده است. در سال‌های اخیر، مقالات متعددی در زمینه ارزیابی خواص مکانیکی مذکور با استفاده از این روش برای مواد مختلف منتشر شده است که در نهایت موجب شد این روش به‌عنوان یک روش استاندارد در حوزه‌های مربوطه شناخته شود. اما در خصوص ارزیابی خواص خستگی با توجه به پیچیده‌تر بودن رفتار خستگی مطالعات محدودی به بررسی رفتار خستگی پانچ کوچک پرداخته‌اند. هدف مقاله حاضر بررسی پاسخ آزمون پانچ کوچک به بارگذاری خستگی در فولاد SS304 و مقایسه آن با خستگی محوری است. بنابراین مقاله حاضر به‌عنوان بخشی از مطالعات لازم در زمینه خستگی پانچ کوچک، برای استانداردسازی این روش

¹ Nowik

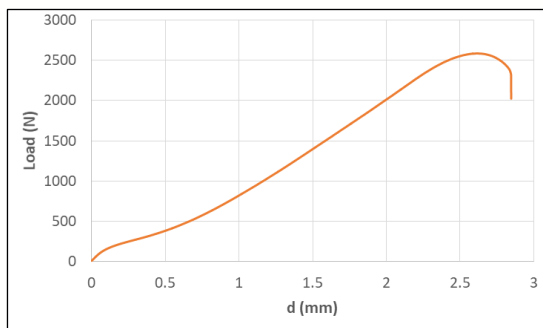
² Otero

³ Kim

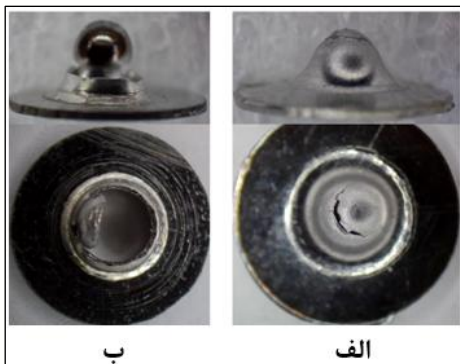
۳- نتایج آزمون و بحث

برای مجموعه‌ای از نمونه‌های آزمون پانچ کوچک مطابق جدول ۲ در دمای محیط آزمون خستگی پانچ کوچک انجام شد، همچنین برای یک نمونه نیز آزمون کشش پانچ کوچک صورت گرفت. در شکل ۵ نمودار نیرو-جابجایی پانچ در آزمون کشش پانچ کوچک ارائه شده است. در شکل ۶ نمونه پس از آزمون کشش پانچ کوچک با نمونه پس از آزمون خستگی پانچ کوچک انجام مقایسه شده است. همانطور که در شکل ۶ نمایش داده شده است محل شکست در آزمون کشش پانچ کوچک در شعاع کمتری نسبت به مرکز نمونه در مقایسه با نمونه خستگی پانچ کوچک انجام اتفاق می‌افتد که بیانگر این موضوع است که شکست در نمونه خستگی پانچ کوچک در تنش کمتری نسبت به تنش نهایی اتفاق می‌افتد.

در شکل ۷ نمونه آزمون خستگی پانچ کوچک پس از آزمون نمایش داده شده است. در این شکل خطوط ساحلی که نشان دهنده رشد ترک خستگی در این آزمون است به وضوح قابل مشاهده است.

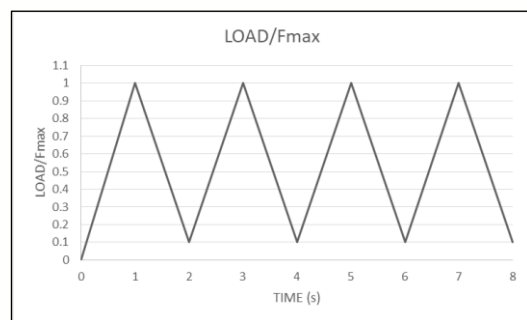


شکل ۵) نمودار نیرو-جابجایی در آزمون کشش پانچ کوچک



شکل ۶) الف) نمونه پس از آزمون کشش پانچ کوچک (ب) نمونه پس از آزمون خستگی پانچ کوچک

در آزمون پانچ کوچک کششی^۱ (SPT) بارگذاری روی نمونه به صورت جابه‌جایی یکنواخت و با نرخ 0.2 mm/min و در آزمون خستگی پانچ کوچک^۲ (SPF) به صورت امواج مثلثی نشان داده شده در شکل ۴ به نمونه اعمال می‌شود. برای همه نمونه‌ها نسبت بارگذاری و فرکانس اعمال نیرو یکسان و به ترتیب برابر $R = 0.1$ و $f = 0.5 \text{ Hz}$ می‌باشد. آماده‌سازی نمونه‌های آزمایش براساس استاندارد اروپایی بوده و به منظور کاهش اصطکاک پیش از آزمون سطح زیر پانچ چرب شده است.



شکل ۴) بارگذاری چرخه‌ای در آزمون خستگی پانچ کوچک (SPF)

نمونه‌های مورد استفاده در این مطالعه از فولاد ضد زنگ SS304 ساخته شده‌اند. این نوع فولاد به دلیل ترکیب شیمیایی، خواص مکانیکی، جوش‌پذیری و مقاومت در برابر خوردگی در صنایع مختلف به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد. ترکیب شیمیایی SS304 مورد استفاده در جدول ۱ خلاصه شده است.

جدول ۱) ترکیب شیمیایی فولاد SS304 مورد آزمون

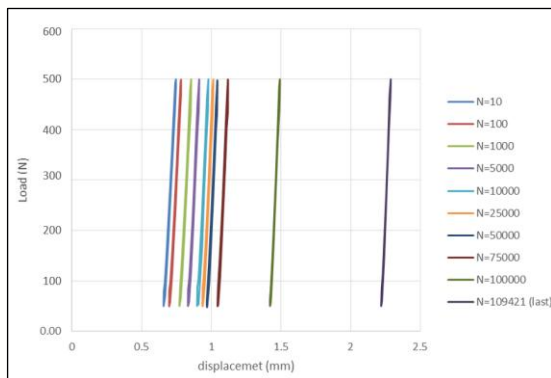
عنصر	درصد وزنی	عنصر	درصد وزنی
Fe	70.9973	Cr	18.2792
Al	0.1408	Ni	8.37804
Sn	0.00778	Mn	1.09183
Ti	0.00814	P	0.02488
W	0.04773	S	0.00421
Cu	0.20174	Si	0.60173
V	0.09096	C	0.02887
Mo	0.05338		

¹ Small Punch Tensile

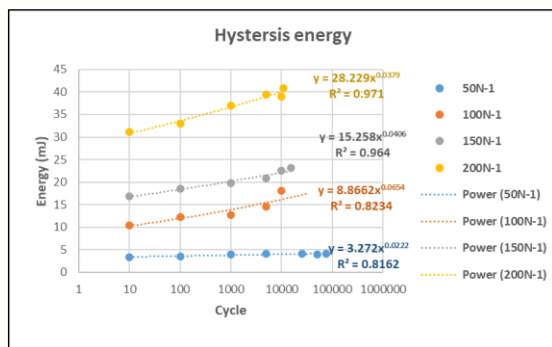
² Small Punch Fatigue

$$F_{max} = 3.415 \times 10^5 N_f^{-0.554} \quad (1)$$

به منظور بررسی رفتار هیستریزس در آزمون خستگی پانچ کوچک، حلقه هیستریزس نمودار نیرو-جابجایی آزمون نمونه 50N-2 در طول بارگذاری در شکل ۹ نمایش داده شده است. چنانچه انرژی حلقه هیستریزس در طول بارگذاری برای این نمونه آزمون و سایر سطوح بارگذاری محاسبه شود نتایج به صورت شکل ۱۰ خواهد بود. همانطور که از شکل ۱۰ مشخص است با افزایش تعداد سیکل بارگذاری انرژی حلقه هیستریزس افزایش پیدا کرده و با تعداد سیکل بارگذاری رابطه توانی دارد. این رفتار مشابهت آزمون خستگی پانچ کوچک با آزمون خستگی محوری از منظر انرژی هیستریزس را نشان می‌دهد.



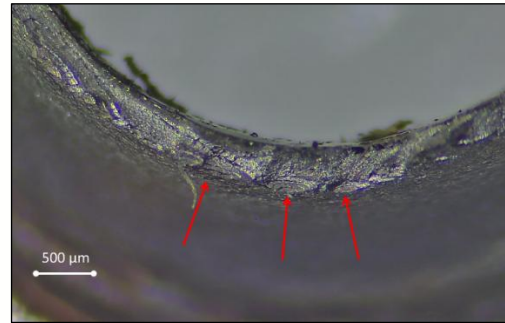
شکل ۹) حلقه هیستریزس نمودار نیرو-جابجایی آزمون نمونه 50N-2 در طول بارگذاری



شکل ۱۰) انرژی حلقه هیستریزس در طول بارگذاری خستگی

۴- نتیجه‌گیری

با مقایسه شکل نمونه آزمون پس از آزمون خستگی پانچ کوچک با نمونه پس از آزمون کشش پانچ کوچک مشاهده می‌شود که شکست در آزمون کشش پانچ کوچک در شعاع کمتری نسبت به مرکز نمونه در مقایسه با نمونه

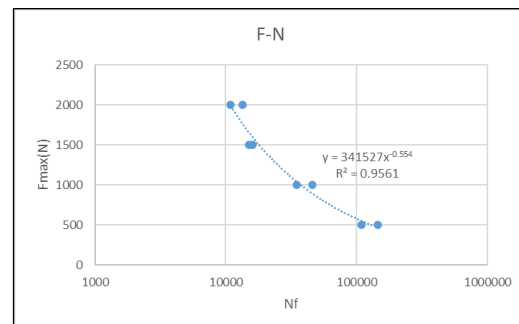


شکل ۷) خطوط ساحلی ناشی از رشد ترک خستگی در نمونه شماره 150N-1 در آزمون خستگی پانچ کوچک

جدول ۲) نمونه‌های آزمون خستگی پانچ کوچک

شماره نمونه	F_{max} (N)	نسبت بارگذاری R	فرکانس f	$N_f/10^3$
50N-1	500	0.1	0.5	145
50N-2	500	0.1	0.5	109
100N-1	1000	0.1	0.5	35
100N-2	1000	0.1	0.5	46
150N-1	1500	0.1	0.5	15
150N-2	1500	0.1	0.5	16
200N-1	2000	0.1	0.5	11
200N-2	2000	0.1	0.5	14

در شکل ۸ نمودار نیرو برحسب تعداد سیکل تا شکست برای نمونه‌های جدول ۲ ترسیم شده است. همانطور که در شکل ۸ ارائه شده است رابطه بین نیرو و تعداد سیکل مطابق معادله ۱ به صورت توانی بوده که از این جهت مشابه نمودار تنش برحسب تعداد سیکل در آزمون تک محوری استاندارد می‌باشد.



شکل ۸) نمودار نیرو برحسب تعداد سیکل شکست

- DISK BEND TEST FOR THE DETERMINATION OF POSTIRRADIATION MECHANICAL PROPERTIES. *Journal of Nuclear Materials*, 104(C), 1545–1550.
- [2] Chi, S. H., Hong, J. H., & Kim, I. S. (1994). EVALUATION OF IRRADIATION EFFECTS OF 16 MeV PROTON-IRRADIATED 12Cr1MoV STEEL BY SMALL PUNCH TESTS. *Scripta Metallurgica et Materialia*, 30(12), 1521–1525.
- [3] Lucas, G. E. (1990). REVIEW OF SMALL SPECIMEN TEST TECHNIQUES FOR IRRADIATION TESTING. *Metallurgical Transactions A*, 21(4), 1105–1119.
- [4] Kameda, J., & Buck, O. (1986). EVALUATION OF THE DUCTILE-TO-BRITTLE TRANSITION TEMPERATURE SHIFT DUE TO TEMPER EMBRITTLEMENT AND NEUTRON IRRADIATION BY MEANS OF A SMALL-PUNCH TEST. *Materials Science and Engineering*, 83(1), 29–38.
- [5] Mao, X., & Kameda, J. (1991). SMALL-PUNCH TECHNIQUE FOR MEASUREMENT OF MATERIAL DEGRADATION OF IRRADIATED FERRITIC ALLOYS. *Journal of Materials Science*, 26(9), 2436–2440.
- [6] Song, S. H., Faulkner, R. G., Flewitt, P. E. J., Marmy, P., & Weng, L. Q. (2004). SMALL PUNCH TEST EVALUATION OF NEUTRON-IRRADIATION-INDUCED EMBRITTLEMENT OF A Cr-Mo LOW-ALLOY STEEL. *Materials Characterization*, 53(1), 35–41.
- [7] Baik, J. M., Kameda, J., & Buck, O. (1983). SMALL PUNCH TEST EVALUATION OF INTERGRANULAR EMBRITTLEMENT OF AN ALLOY STEEL. *Scripta Metallurgica*, 17(12), 1443–1447.
- [8] Ha, J. S., & Fleury, E. (1998). SMALL PUNCH TESTS ON STEELS FOR STEAM POWER PLANT (II): DUCTILE-BRITTLE TRANSITION TEMPERATURE. *KSME International Journal*, 12(5), 818–826.
- [9] Foulds, J. R., Woytowicz, P. J., Parnell, T. K., & Jewett, C. W. (1995). FRACTURE TOUGHNESS BY SMALL PUNCH TESTING. *Journal of Testing and Evaluation*, 23(1), 3–10.
- [10] Giddings, V. L., Kurtz, S. M., Jewett, C. W., Foulds, J. R., & Edidin, A. A. (2001). A SMALL PUNCH TEST TECHNIQUE FOR CHARACTERIZING THE ELASTIC MODULUS AND FRACTURE BEHAVIOR OF PMMA BONE CEMENT USED IN TOTAL JOINT REPLACEMENT. *Biomaterials*, 22(13), 1875–1881.
- [11] Klevtsov, I., Dedov, A., & Molodtsov, A. (2009). MEASUREMENT OF THE TENSILE AND YIELD STRENGTH OF BOILER STEELS BY SMALL PUNCH AND TENSILE TEST METHODS. *Estonian Journal of Engineering*, 15(2), 99–107.
- [12] Dobeš, F., & Milička, K. (2010). ESTIMATION OF DUCTILITY OF Fe-Al ALLOYS BY MEANS OF SMALL PUNCH TEST. *Intermetallics*, 18(7), 1357–1359.
- آزمون خستگی پانچ کوچک رخ می‌دهد که بیانگر این واقعیت است که شکست در نمونه خستگی پانچ کوچک در تنش کمتری نسبت به تنش نهایی اتفاق می‌افتد.
- در آزمون خستگی پانچ کوچک نمودار نیرو برحسب تعداد سیکل تا شکست صورت‌توانی بوده که از این جهت مشابه نمودار تنش برحسب تعداد سیکل در آزمون خستگی تک‌محوری استاندارد می‌باشد.
- در نمونه آزمون پانچ کوچک پس از اعمال بارگذاری خستگی خطوط ساحلی ناشی از رشد ترک خستگی در این آزمون به وضوح قابل مشاهده می‌باشد.
- در طول آزمون خستگی پانچ کوچک با افزایش تعداد سیکل‌های بارگذاری، انرژی حلقه هیستریزس افزایش پیدا کرده و رابطه این انرژی با تعداد سیکل به صورت توانی می‌باشد.
- به عنوان نتیجه‌گیری می‌توان گفت که رفتار خستگی در آزمون پانچ کوچک شامل انرژی هیستریزس، نمودار بارگذاری-عمر و شکل شکست مشابه آزمون خستگی تک‌محوری می‌باشد.
- با توجه به نتایج مطالعه پاسخ آزمون پانچ کوچک به بارگذاری خستگی و مشابهت آن با آزمون خستگی تک‌محوری در کنار مزایای استفاده از این روش انتظار می‌رود این روش به عنوان یک روش شبه غیرمخرب کارآمد در ارزیابی خواص خستگی مواد به کار رفته در سازه‌ها مورد استفاده قرار گیرد و در نهایت هم‌چون آزمون پانچ کوچک کششی و پانچ کوچک خزشی به عنوان آزمونی استاندارد برای ارزیابی خواص خستگی مواد مطرح گردد.

۵- فهرست علائم

نسبت نیروی بیشینه به کمینه در آزمون خستگی	
فرکانس بارگذاری	f
بیشینه نیرو در آزمون خستگی	F_{max}
تعداد سیکل تا شکست	N_f
جابه‌جایی پانچ	d
جابه‌جایی تثبیت شده (پس از ۱۰ هزار سیکل)	d_{st}

۶- منابع

- [1] Manahan, M. P., Argon, A. S., & Harling, O. K. (1981). THE DEVELOPMENT OF A MINIATURIZED

- SPECIMENS THROUGH NOVEL FATIGUE TEST METHODS: EXPERIMENTAL RESULTS AND NUMERICAL SIMULATION. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 103, 102304.
- [25] Lewis, D. T. S., Lancaster, R. J., Jeffs, S. P., Illsley, H. W., Davies, S. J., & Baxter, G. J. (2019). CHARACTERISING THE FATIGUE PERFORMANCE OF ADDITIVE MATERIALS USING THE SMALL PUNCH TEST. *Materials Science and Engineering A*, 754, 719–727.
- [26] Zhao, L., Wang, X., Xu, L., Han, Y., & Jing, H. (2021). FATIGUE PERFORMANCE OF HASTELLOY X AT ELEVATED TEMPERATURE VIA SMALL PUNCH FATIGUE TEST. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 116, 103118.
- [27] Zhang, J., Guo, Z., & Liu, K. (2022). MECHANICAL PROPERTIES STUDY OF MINIATURE STEEL SPECIMENS BASED ON THE SMALL PUNCH TEST AND SIMULATION METHODS. *Materials*, 15(19), 6542.
- [28] Nowik, K., & Oksiuta, Z. (2022). EXPERIMENTAL AND NUMERICAL SMALL PUNCH TESTS OF THE 14Cr ODS FERRITIC STEEL. *Acta Mechanica et Automatica*, 16(3), 225–232.
- [29] Otero, S., Álvarez, G., Llera, M. M., & Rodríguez, C. (2025). FATIGUE CHARACTERISATION OF STRUCTURAL STEEL BY MEANS OF THE SMALL PUNCH TEST: DEVELOPMENT OF A METHODOLOGY. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 135, 104772.
- [30] Kim, S., Kim, Y. H., Lee, T., & Kim, M. K. (2025). DEVELOPMENT OF THE SMALL PUNCH FATIGUE TEST METHOD BASED ON THE FINITE ELEMENT METHOD. *International Journal of Fatigue*, 190, 108656.
- [13] Li, K., Peng, J., & Zhou, C. (2018). CONSTRUCTION OF WHOLE STRESS-STRAIN CURVE BY SMALL PUNCH TEST AND INVERSE FINITE ELEMENT. *Results in Physics*, 11, 440–448.
- [14] Sainte Catherine, C., Messier, J., Poussard, C., Rosinski, S., & Foulds, J. (2002). SMALL PUNCH TEST: EPRI-CEA FINITE ELEMENT SIMULATION BENCHMARK AND INVERSE METHOD FOR THE ESTIMATION OF ELASTIC PLASTIC BEHAVIOR. *ASTM Special Technical Publication*, 1418, 350–370.
- [15] Abendroth, M., & Kuna, M. (2006). IDENTIFICATION OF DUCTILE DAMAGE AND FRACTURE PARAMETERS FROM THE SMALL PUNCH TEST USING NEURAL NETWORKS. *Engineering Fracture Mechanics*, 73(6), 710–725.
- [16] Abendroth, M., & Kuna, M. (2004). DETERMINATION OF DUCTILE MATERIAL PROPERTIES BY MEANS OF THE SMALL PUNCH TEST AND NEURAL NETWORKS. *Advanced Engineering Materials*, 6(7), 536–540.
- [17] Altstadt, E., et al. (2016). CRITICAL EVALUATION OF THE SMALL PUNCH TEST AS A SCREENING PROCEDURE FOR MECHANICAL PROPERTIES. *Journal of Nuclear Materials*, 472, 186–195.
- [18] Comité Européen de Normalisation (CEN). (2006). *WORKSHOP AGREEMENT: SMALL PUNCH TEST METHOD FOR METALLIC MATERIALS*. CWA 15627, Parts A and B.
- [19] CEN CWA 15627. (2006). *WORKSHOP AGREEMENT: SMALL PUNCH TEST METHOD FOR METALLIC MATERIALS*. European Committee for Standardization, Brussels.
- [20] Holmström, S., et al. (2018). CREEP STRENGTH AND MINIMUM STRAIN RATE ESTIMATION FROM SMALL PUNCH CREEP TESTS. *Materials Science and Engineering A*, 731, 161–172.
- [21] Dymáček, P. (2016). RECENT DEVELOPMENTS IN SMALL PUNCH TESTING: APPLICATIONS AT ELEVATED TEMPERATURES. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 86, 25–33.
- [22] Bruchhausen, M., et al. (2016). RECENT DEVELOPMENTS IN SMALL PUNCH TESTING: TENSILE PROPERTIES AND DBTT. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 86, 2–10.
- [23] Lancaster, R. J., Jeffs, S. P., Illsley, H. W., Argyrakis, C., Hurst, R. C., & Baxter, G. J. (2019). DEVELOPMENT OF A NOVEL METHODOLOGY TO STUDY FATIGUE PROPERTIES USING THE SMALL PUNCH TEST. *Materials Science and Engineering A*, 748, 21–29.
- [24] Prakash, R. V., Dhaka, P., Prasad Reddy, G. V., & Sandhya, R. (2019). UNDERSTANDING THE FATIGUE RESPONSE OF SMALL VOLUME