

تعیین استحکام استاتیکی و شکست سازه هواپیماهای فرسوده با استفاده از آزمایش غیرمخرب نفوذ شبه استاتیکی

حمیدرضا زارعی^۱، رضا سرخوش^{۲*}، امین فرخ آبادی^۳، حمید مرشدی^۴

۱- دانشیار، مرکز تحصیلات تکمیلی، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران، ایران

۲- مربی، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران، ایران

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۴- کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

(دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۵/۱۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۲۱)

چکیده

با توجه به غیرممکن بودن انجام آزمایش‌های مخرب، بر روی ناوگان هواپیمایی نیاز به روش‌های جدید و غیرمخرب به شدت احساس می‌شود. در پژوهش حاضر با استفاده از روش غیرمخرب نفوذ اتوماتیک گوی (ناگ) برخی از خواص مکانیکی فولاد ۴۳۴۰ آنیل شده و آلومینیوم ۷۰۷۵ خام و تهیه شده از هواپیمای فرسوده تعیین شده است. به منظور انجام محاسبات مربوط به روش ناگ کدنویسی روابط صریح در نرم‌افزار فرترن انجام و اعتبار سنجی شده است. در ادامه نمونه‌های آزمون کشش تک محوری از فولاد ۴۳۴۰ آنیل شده و آلومینیوم ۷۰۷۵ خام و تهیه شده از هواپیمای فرسوده آماده شده و منحنی تنش کرنش آن استخراج شده است. همچنین آزمون نفوذ اتوماتیک گوی بر روی نمونه‌های فولادی ۴۳۴۰ آنیل شده و آلومینیوم ۷۰۷۵ خام و تهیه شده از هواپیمای فرسوده انجام گردید و نتایج حاصل از دو روش با هم مقایسه شد. نتایج مقایسه بین آزمایش کشش و ناگ نشان داد که خطای محاسبه تنش تسلیم و استحکام نهایی، به ترتیب کم‌تر از ۹ و ۱۴٪ بود. با افزایش نیرو، این مقدار در برخی نقاط به کم‌تر از ۰/۷٪ رسید.

واژه‌های کلیدی: نفوذ اتوماتیک گوی، ناگ، غیر مخرب، تنش-کرنش

Determination of static strength and fracture of aged aircraft structure using non-destructive quasi-static indentation test

Hamidreza Zarie, Reza Sarkhosh*, Amin Farrokhhabadi and Hamid Morshedi

Abstract

Due to the impossibility of performing destructive tests, the need for new and Non-Destructive Tests (NDT) in this area is strongly felt. In the present study, using the non-destructive method of Automated Ball Indentation (ABI) test method, some mechanical properties of 4340 annealed steel and 7075 raw aluminum and prepared from aged aircraft are determined. To perform calculations related to ABI method, the explicit relations routine was coded in FORTRAN and verified. Then samples of uniaxial tensile test of 4340 annealed steel and 7075 raw aluminum and prepared from aged aircraft are prepared and their stress-strain curves are obtained. Also, ABI tests are performed on 4340 annealed steel samples and 7075 raw aluminum and prepared from aged aircraft and the results of the two methods were compared. The comparison of results showed that the calculated error of yield strength and ultimate strength was less than 9 and 14%, respectively. With increasing force, this value in some areas reached less than 0.7%.

Key words: Automated Ball Indentation, ABI, NDT, Stress- Strain.

۱- مقدمه

با توجه به رشد روزافزون صنایع و حجم سازه‌ها و رویکرد پرهیز از افزایش هزینه در صنایع، توسعه چشمگیر آزمایش‌های غیرمخرب در سال‌های اخیر مشاهده می‌شود. همچنین، ضرورت اجرای آزمایش‌های در محل^۱، خصوصاً برای سازه‌هایی که در حال به‌کارگیری هستند به شدت احساس می‌گردد. از این رو، روش‌های مختلفی مانند روش‌های آزمایش مبتنی بر اشعه، مورد استفاده قرار گرفته‌اند و در حال گسترش هستند.

یکی از روش‌هایی که با موفقیت برای استخراج خواص مهندسی ابداع شده است، روش آزمایش غیر مخرب نفوذ استاتیکی یا نفوذ اتوماتیک گوی^۲ (ناگ) (ABI) است. در ابتدا، میر [۱] بود که رابطه بین فشار متوسط و قطر نفوذ را به منظور ارزیابی تنش تسلیم مواد استفاده کرد. تیبور [۲]، پس از ایجاد تغییر شکل با استفاده از گوی کرومی، رابطه‌ای تجربی به منظور یافتن کرنش مواد ارائه نمود. رابطه تیبور برای نفوذ کاملاً پلاستیک، نتایج بهتری ارائه می‌دهد [۳].

حقات و همکارانش [۴] برای اولین بار از دستگاه ناگ برای تعیین مستقیم خواص سیلان استفاده کردند. حقات و نانستاد [۵] روشی ساده برای تخمین چقرمگی شکست با استفاده از مرتبط کردن خواص سیلان اندازه‌گیری شده با یک رابطه تجربی اصلاح شده مرتبط با مدل کرنش بحرانی شکست ارائه کردند.

خاندلوال و همکارانش [۶] با استفاده از روش ناگ، خواص مکانیکی جوش‌های مشابه یکدیگر را بر روی لوله‌های فولادی SS 304 LN بررسی کردند. در این روش، با استفاده از خاصیت اندازه‌گیری محلی خواص مکانیکی در روش ناگ، نواحی مختلف جوش (فلز پایه، ناحیه تحت تاثیر حرارت^۳ (HAZ) و ناحیه جوش) مورد بررسی قرار گرفت و نتایج بسیار دقیقتری از خواص در نواحی مذکور به دست آمد.

در دو مقاله ترودونوشین و همکارانش [۷] و پوچنین و همکاران [۸]، تاثیر ترکیب شیمیایی و عملیات حرارتی بر روی میکروساختار و خواص مکانیکی آلیاژهای مختلفی از آلومینیوم را با استفاده از روش ناگ، میکروسکوپ اسکن و انتقال الکترونی و تحلیل پراش انرژی اشعه ایکس بررسی کردند. با

مقایسه‌ای که در کارهای ذکر شده، بین ناگ و روش‌های دیگر صورت گرفت صحت نتایج ناگ مورد تایید قرار گرفت.

شارما و همکارانش [۳]، روشی نوینی با استفاده از رایانه برای استخراج خواص حاصل از آزمایش نفوذ ارائه کردند. در این کار، با استفاده از روش اجزای محدود و روش شبکه عصبی، ضرایب رابطه توانی تنش-کرنش به دست آمده و با نتایج حاصل از ناگ مقایسه شدند که نتایج ناگ با استفاده از روش‌های ذکر شده تایید شد. همچنین، شدل و همکارانش [۹] نیز با استفاده از مدل چابوچه، قانون توانی و کوپل اجزای محدود و روش بدون المان گالرکین خواص ماده را استخراج کردند که تاییدی بر نتایج ناگ است.

سامال و همکاران [۱۰] به مطالعه‌ای بر روی ناحیه تغییر شکل یافته پلاستیک در زیر توپ در آزمایش‌های نفوذ شبه‌استاتیکی و ارزیابی خواص مکانیکی مواد از طریق شبیه‌سازی المان محدود و الگوریتم ترکیبی پرداختند آنها در این پژوهش، یک الگوریتم ترکیبی جدید برای برآورد تنش معادل و کرنش پلاستیکی معادل در حین فرورفتگی در پرتنش‌ترین مکان زیر گوی توسعه دادند. این الگوریتم‌ها از داده‌های آزمایشی بار-تورفتگی و پارامترهای تنش و کرنش چند محوری استفاده می‌کنند که از شبیه‌سازی المان محدود الاستیک پلاستیکی دو بعدی محوری بدست آمده است. کومار و همکاران [۱۱] به ارزیابی خواص کششی فولاد ضد زنگ LN ۳۱۶ پیر شده توسط حرارت با میزان متفاوت نیتروژن با استفاده از تکنیک ABI پرداختند. آنها فولاد ضد زنگ نوع LN ۳۱۶ با میزان متفاوت نیتروژن (۰.۰۷، ۰.۱۴ و ۰.۲۲ درصد وزنی) در دمای ۸۷۳ و ۹۲۳ درجه کلوین به مدت ۲۰۰۰۰ ساعت را دچار پیر حرارتی کردند. آنها با استفاده از تکنیک ABI به این نتیجه رسیدند که هرچه میزان نیتروژن و دمای پیری بیشتر باشد، میزان ته نشینی به دلیل افزایش سن، افزایش می‌یابد، که در رفتار کششی منعکس می‌شود.

توجه به این نکته حائز اهمیت است که تعیین زمان دقیق بازنشستگی یک هواپیما کار ساده‌ای نیست و تاریخ ساخت یک هواپیما نیز ملاک صحیحی برای بازنشسته نمودن آن نمی‌باشد، زیرا پیر شدن یک هواپیما بستگی به عوامل مختلفی مانند تعداد پرواز، مقدار ساعات پروازی، شرایط آب و هوایی، میزان تنش‌های وارد شده و ... داشته و بخش‌های مختلف هر هواپیما به میزان متفاوتی تحت تاثیر این عوامل قرار می‌گیرند. ولی

¹ In-situ

² Automated Ball Indentation

³ Heat Affected Zone

دلیل امکان تشخیص عیوب با دسترسی به یک طرف جسم، پتانسیل پیاده سازی NDT را برای نگهداری و بازرسی هواپیما دارد.

در پژوهش قبلی [۱۲] با استفاده از تست های مخرب نشان داده شد که سازه های هوایی در اثر پدیده پیری به علت قابلیت رسوب سختی آلیاژ بکار رفته، استحکامشان افزایش می یابد. با توجه به غیرممکن بودن انجام آزمایش های مخرب، بر روی ناوگان هواپیمایی نیاز به روش های جدید و غیرمخرب به شدت احساس می شود. در پژوهش حاضر با استفاده از روش غیرمخرب نفوذ اتوماتیک گوی (ناگ) برخی از خواص مکانیکی فولاد ۴۳۴۰ آنیل شده و آلومینیوم ۷۰۷۵ خام و تهیه شده از هواپیمای فرسوده تعیین شده است. به منظور انجام محاسبات مربوط به روش ناگ کدنویسی روابط صریح در نرم افزار فرترن انجام و اعتبار سنجی شده است. در ادامه نمونه های آزمون کشش تک محوری از فولاد ۴۳۴۰ آنیل شده و آلومینیوم ۷۰۷۵ خام و تهیه شده از هواپیمای فرسوده آماده شده و منحنی تنش کرنش آن استخراج شده است. همچنین آزمون نفوذ اتوماتیک گوی بر روی نمونه های فولادی ۴۳۴۰ آنیل شده و آلومینیوم ۷۰۷۵ خام و تهیه شده از هواپیمای فرسوده انجام گردید.

۲- تئوری

روش ناگ بر روی فولادهای کربنی، فولادهای زنگ نزن، آلیاژهای نیکل، آلیاژهای آلومینیوم، آلیاژهای زیرکونیوم، مواد الکترونیکی لحیم شده و فولادهای هسته ای مخازن تحت فشار انجام شده است. علاوه بر کاربردهای آزمایشگاهی میکروپرآب تنش-کرنش، می توان از آن به صورت ابزار آزمایش «درمحل» برای تخمین غیرمخرب خصوصیات تغییر شکل و شکست اجزای سازه ای در حال کار استفاده کرد [۱۶]. با در نظر گرفتن این موضوع که بارگذاری نفوذ بر روی نمونه به نمودار نیرو-جابجایی به صورت شکل ۱ می انجامد، شکل ۲ نمایش طرحواره تغییر شکل های این نمونه است. آنچنان که در شکل ۱ و ۲ نیز مشخص است، این بارگذاری- باربرداری در چند مرحله صورت می گیرد. هر مرحله از بارگذاری و باربرداری، در این آزمایش به یک نقطه در نمودار تنش حقیقی-کرنش پلاستیک حقیقی منجر می شود. به منظور دستیابی به مقدار تنش تسلیم در

می توان گفت هنگامی که جایگزین کردن یک هواپیما مقرون به صرفه تر از نگهداشتن آن باشد، زمان بازنشستگی آن فرا رسیده است [۱۲]. اما تشخیص این برآورد، کار بسیار پیچیده ای است و نیاز به تحقیقات و بررسی های بسیار وسیعی دارد. همان گونه که اشاره شد، پدیده پیری یک مقوله بسیار وسیع می باشد بنابراین، دامنه بررسی آن نیز گسترده بوده و از جنبه های گوناگون قابل بررسی است. در بخش سازه ای میزان کاهش استحکام مواد بکار رفته در سازه های مختلف یک وسیله پرنده می تواند ملاک مناسبی جهت تعیین میزان فرسودگی آن باشد. لذا برای بررسی میزان کاهش استحکام سازه ای، انجام آزمایش های مختلفی در زمینه های خواص مکانیکی و فیزیکی، رسوب گذاری و رشد رسوبات در زمینه فاز مادر، مشخصه یابی افت خواص مکانیکی با استفاده از آزمون های مرتبط، خستگی، خوردگی تنشی و دیگر عوامل می تواند تا حد زیادی مفید واقع شود. پدیده پیری وسایل پرنده مسئله ای است که تنها مختص ایران نمی باشد و اغلب کشورهای جهان خصوصاً آمریکا با آن روبرو هستند. اما این کشورها مدت ها است که برای تمدید عمر ناوگان هوایی خود به چاره اندیشی پرداخته و در این زمینه اقدامات و آزمایش های متعددی انجام داده اند [۱۲].

نیروی هوایی ایالت متحده از شورای تحقیقات ملی درخواست نموده است که مقدمات تحقیق و توسعه جهت پشتیبانی از عملیاتی نمودن هواپیماهای پیر آنها را فراهم نماید که حاصل آن فراهم نمودن گزارش کاملی است که شورای تحقیقات ملی آمریکا در سال ۱۹۹۱ منتشر نمود و کلیه الزامات هواپیماهای پیر از جمله اقدامات مدیریتی و مهندسی و نیز برنامه تعمیر و نگهداری در آن بررسی شده است [۱۳]. ونوگوپال و همکاران [۱۴] تأثیر محیط گرمسیری بر خرابی خستگی سازه هواپیماهای رویال نیروی هوایی مالزی (RMAF) و آمادگی عملیاتی آنها را بررسی کردند. آنها تأثیر پارامترهای دما و حرارت محیط گرمسیری بر خوردگی و خرابی خستگی و طول عمر یک لانگرون هواپیما را بررسی نمودند. نورمن و همکاران [۱۵] امکان سنجی استفاده از روش صوتی ناشی از تنش حرارتی القا شده از تابش اشعه ایکس^۴ (XACT) برای آزمایش های غیرمخرب سازه های هوایی را بررسی کردند. آنها در این پژوهش نشان دادند که روش غیر مخرب XACT به

⁴ X-RAY INDUCED ACOUSTIC COMPUTED TOMOGRAPHY

کالیبراسیونی برای تعیین مقدار β_m برای فلزات مختلف صورت گیرد. نتیجه اخیر، بیانگر نیاز به آزمایش‌های دیگر و یا توجه به خواص اولیه ماده مورد آزمایش است اما معمولاً در نبود این اطلاعات مقدار ۰/۱۹۱ نتایج مناسبی ارائه می‌کند. با توجه به مرجع [۱۹] قانون ۰/۲٪ برای کرنش تسلیم در اکثر فلزات قابل قبول و قابل استفاده است.

به منظور تعیین استحکام نهایی مهندسی، رابطه‌ای در مرجع [۱۷] ارائه شده است که به صورت زیر می‌باشد:

$$UTS = K(n/e)^n \quad (۴)$$

اندازه‌گیری چقرمگی شکست مواد فلزی بر اساس استانداردهای آزمایش ASTM (E-399 یا E-813) پرهزینه و زمان‌بر است. اگرچه اندازه‌گیری مزبور به منظور ارزیابی مکانیک شکست، ضروری است، نیاز به روش‌های تقریبی، سریع و کم‌هزینه‌تری نسبت به آزمایش چقرمگی شکست احساس می‌شود. این روش‌ها حتی با وجود محدودیت در گستره قابل استفاده بودن، در مراحل ابتدایی تولید یا توسعه یک آلیاژ مهم به نظر می‌رسند [۵].

مدل کرنش شکست بحرانی برای پیش‌بینی شکست نرم می‌تواند به صورت زیر بیان شود [۲۰] و [۲۱]:

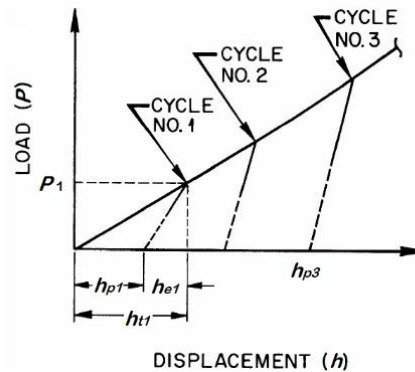
$$K_{JIC} = C(\epsilon_f^* l_0^* E \sigma_y)^{0.5} \quad (۵)$$

و همچنین، مدل اصلاح شده‌ای [۲۲] از این مدل با دو تفاوت وجود دارد: (۱) استفاده از کرنش یکنواخت اندازه‌گیری شده از آزمایش کشش یا توان کرنش‌سختی از آزمایش‌های ناگ، به جای استفاده از مقدار کرنش شکست بحرانی مورد نیاز در مدل اصلی و (۲) فرض مقدار تجربی کالیبره شده برای فاصله مشخصه (l_0^*) برای هر گروه‌ای از مواد. تعیین کرنش شکست بحرانی، نیازمند آزمایش کشش تعدادی نمونه با ناچ محیطی است که شعاع ناچ ریشه آن‌ها متفاوت از یکدیگر باشد. با توجه به جایگزینی کرنش شکست با توان کرنش‌سختی رابطه (۵) مبدل به رابطه زیر می‌شود:

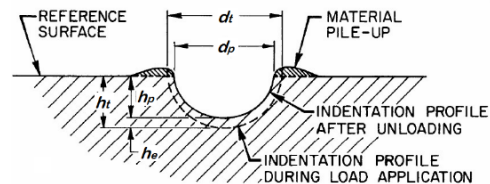
$$K_{JIC} = C(n, l_0^* E \sigma_y)^{0.5} \quad (۶)$$

در رابطه اخیر، فاصله مشخصه، مضربی از فاصله بین بزرگ‌ترین حفره‌ها در یک سطح شکسته شده است [۵]. به طور مثال، فاصله مشخصه برای فولاد A533 گرید B کلاس 1 و فولاد A515، به ترتیب برابر مقدار ۳۵۰ و ۲۵۰ میکرومتر تخمین زده شده‌اند (در مراجع [۵] و [۱۸]). لازم به ذکر است که با توجه به مرجع [۵] مقدار فاصله مشخصه با استفاده از

نمودار تنش-کرنش، روشی ارائه شده است که توضیحات آن در ادامه خواهد آمد. بر اساس هندسه محل نفوذ می‌توان نوشت:



شکل ۱- طرح‌واره نمایش رابطه بین نیروی نفوذ و عمق فرورفتگی گوی نفوذکننده با چرخه نیروی در حال افزایش. شیب‌های باربرداری کشسان به دلیل افزایش حجم کروی تغییر شکل یافته با افزایش نیرو، موازی نیستند [۱۷].



شکل ۲- نمایش هندسه نفوذ گوی پیش و پس از بارگذاری (در نمایش بیرون‌جهیدگی در ماده اغراق شده است) [۱۷].

$$d_t = 2(Dh_t - h_t^2)^{0.5} \quad (۱)$$

و با رسم داده‌های آزمایش تا $d_t/D=1$ و همچنین، برازش خطی بر اساس رابطه توانی زیر:

$$P/d_t^2 = A(d_t/D)^{m-2} \quad (۲)$$

می‌توان ضریب A را محاسبه کرد. در نتیجه، تنش تسلیم از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\sigma_y = \beta_m A \quad (۳)$$

که ضریب β_m در این رابطه برای هر دسته‌ای از فلزات متفاوت است [۱۸]. به طور مثال، با استفاده از یکی از منابع موجود ([۱۹])، دو مقدار ۰/۲۶ و ۰/۳۱ برای فولادها و آلومینیوم‌ها پیشنهاد شده‌اند. با توجه به این که مقادیر متفاوتی مانند ۰/۲۲۸۵ [۱۸] و ۰/۱۹۱ [۱۸] نیز به ترتیب برای فولادهای کربنی و زنگ‌نزن ارائه شده‌اند، روند منطقی این است که با استفاده از مقدار A ، تنش تسلیم و رابطه (3)

از سنباده زبر، سطح مزبور صاف گردید. سپس، با کاهش زبری سنباده تا ۱۲۰۰، سطح مذکور کاملاً صیقلی گردید. سطح صیقلی نمونه در شکل ۳ قابل مشاهده است.

در این پژوهش، در ابتدا نمونه‌های اولیه آنیل شدند و سپس، اجرای آزمایش به دو قسمت مختلف تقسیم شد. در بخش اول، آزمایش کشش نمونه فولادی ۴۳۴۰ با استفاده از نمونه کشش شبه‌استاتیکی، مطابق استاندارد ASTM-E8 و در بخش بعدی، آزمایش ناگ با استفاده از دستگاه STM-150 اجرا شد.



شکل ۳- سطح صیقلی نمونه آنیل شده برای اجرای آزمایش ناگ

نمونه آزمایش ناگ، پس از آماده‌سازی سطح نفوذ، مطابق شکل ۳، زیر فک دستگاه STM-150 قرار گرفت. بارگذاری در این آزمایش به صورت کنترل نیرو انجام شد. سرعت حرکت فک در این آزمایش ۱ میلی‌متر بر دقیقه تنظیم گردید. با توجه به ابعاد مناسب نمونه، آزمایش بر روی نمونه چندین بار تکرار شد.



شکل ۴- نمونه ناگ زیر فک دستگاه STM-150

بررسی فرکتوگرافی یا میکروسکوپ الکترونی قابل تخمین است. مقدار ضریب ثابت C برای فولادها بر اساس مرجع [۱۸] برابر ۳ فرض شده است اما برای سایر مواد، نیاز به مطالعات جدیدی وجود دارد.

۳- تحلیل داده‌ها به روش ناگ

داده‌های حاصل از آزمایش باید تحلیل شده و نتایج به صورت نمودارهای مشخص و آشنایی چون نمودار تنش-کرنش بیان شوند. به این منظور، از یک کد کامپیوتری برای حل معادلات زیر و تعیین منحنی سیلان از داده‌های ناگ استفاده می‌شود. d_p در معادله (۹) در هر دو سوی معادله قابل مشاهده است که نشان دهنده ماهیت تکراری^۵ معادله در کد کامپیوتری است:

$$\varepsilon_p = 0.2 d_p / D \quad (7)$$

$$\sigma_t = 4 P / \pi d_p^2 \delta \quad (8)$$

$$d_p = \sqrt[3]{(2.735PD) \frac{[1/E_{spec} + 1/E_{ind}][4h_p^2 + d_p^2]}{4h_p^2 + d_p^2 - 4h_p D}} \quad (9)$$

$$\delta = \begin{cases} 1.12 & \phi \leq 1 \\ 1.12 + \tau \ln \phi & 1 < \phi \leq 27 \\ \delta_{max} & \phi > 27 \end{cases} \quad (10)$$

$$\phi = \varepsilon_p E_{spec} / 0.43 \sigma_t \quad (11)$$

$$\delta_{max} = 2.87 \alpha_m \quad (12)$$

$$\tau = (\delta_{max} - 1.12) / \ln(27) \quad (13)$$

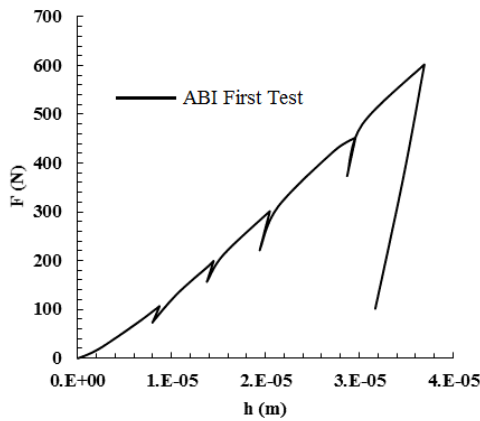
برای فولادهای سازه‌ای با توجه به میزان حساسیت به نرخ کرنش و سخت‌شوندگی، متغیر α_m مقداری بین ۰/۹ تا ۱/۲۵ دارد [۱۶] (برای ماده‌ای با حساسیت پایین به نرخ کرنش، برابر با یک است [۱۷]). این معادلات با استفاده از تحلیل برازش غیرخطی بر روی داده‌های حاصل از آزمایش به دست آمده‌اند [۲۳].

۴- بخش تجربی

۴-۱- آزمایش‌ها

آماده‌سازی سطح نمونه به منظور اجرای آزمایش ناگ، با توجه به مرجع [۱۹] صورت گرفت. در این آزمایش، با استفاده

⁵ Iterative

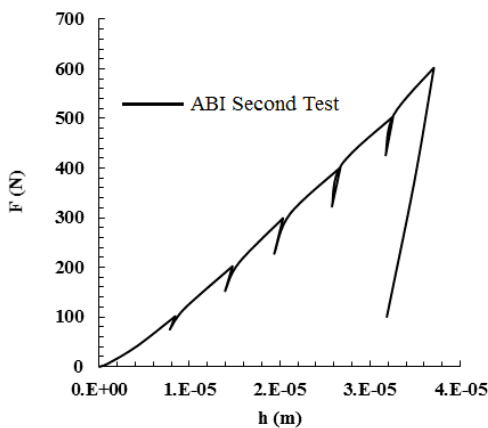


در شکل ۴، دو نمونه آزمایش کشش که با استفاده از دستگاه اینسترون تحت کشش قرار گرفته‌اند، پیش و پس از آزمایش نشان داده شده است.

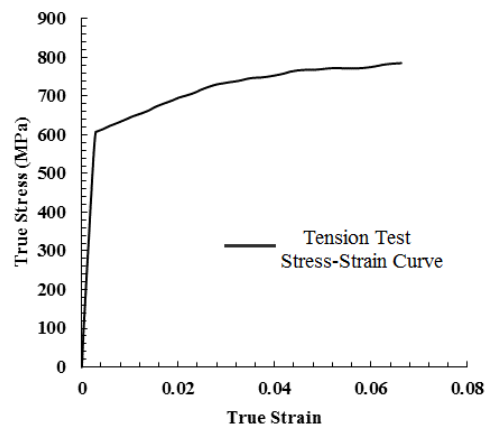


شکل ۵- نمونه کشش پیش و پس از آزمایش کشش

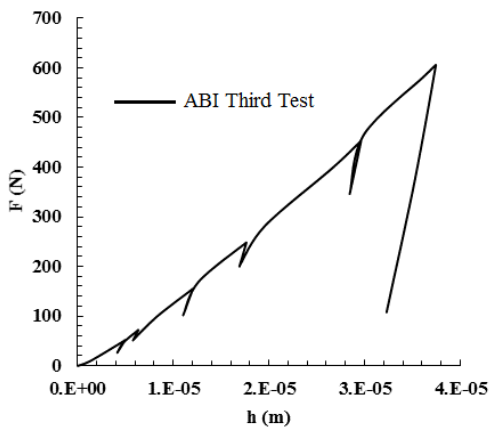
شکل ۷- منحنی نیرو-جابجایی حاصل از نخستین آزمایش ناگ به قطر ۲.۵ میلی‌متر در نمونه فولاد ۴۳۴۰ آنیل شده



در شکل ۶ منحنی تنش-کرنش حاصل از آزمایش کشش نشان داده شده است. این منحنی با استفاده از تبدیل تنش و کرنش‌های مهندسی، برای تنش و کرنش‌های حقیقی رسم شده است. در آزمایشگاه، چند آزمایش نفوذ ناگ بر روی قطعات فولاد 4340 آنیل شده انجام شد. منحنی نیرو-جابجایی حاصل از آزمایش‌های ناگ در شکل ۷، ۸ و ۹ نمایش داده شده است.



شکل ۸- منحنی نیرو-جابجایی حاصل از دومین آزمایش ناگ به قطر ۲.۵ میلی‌متر در نمونه فولاد ۴۳۴۰ آنیل شده



شکل ۶- منحنی تنش-کرنش حقیقی فولاد ۴۳۴۰ آنیل شده حاصل از آزمایش کشش، پیش از گلوبی شدن

شکل ۹- منحنی نیرو-جابجایی حاصل از سومین آزمایش ناگ به قطر ۲.۵ میلی‌متر در نمونه فولاد ۴۳۴۰ آنیل شده

به منظور سهولت در به کارگیری کد فترن، یک رابط کاربری برای ورود داده‌ها طراحی شده است. ضرایب ناگ مربوط به فولاد ۴۳۴۰ در محیط رابط کاربری در شکل ۱۲ نشان داده شده است. نقاط استخراج شده از نمودار نیرو-جابجایی نیز در شکل ۱۳ نمایش داده شده‌اند. این نقاط با استفاده از روش‌های دستی به دست آمده‌اند. در شکل ۱۴ نتایج حاصل از نخستین آزمایش ناگ بر روی نمونه در محیط رابط کاربری نمایش داده شده است. همچنین، در شکل ۱۵ نمودار تنش-کرنش حقیقی حاصل از رابط کاربری نشان داده شده است.

ABI Coefficients	
	Value
alfam	1.00000
betam	0.19100
C	3.0000
D	0.25000E-02
diter	0.10000E-06
Eind	0.68600E+12
er	0.50000E-02
f ³ D	0.35000E-03
siter	0.10000E+07
k	5
N	100000

شکل ۱۲- پنجره ضرایب ناگ در رابط گرافیکی

۵- نتایج و بحث‌ها

پس از استخراج داده‌ها از نمودارهای نیرو-جابجایی، قرار دادن این مقادیر در رابط کاربری و اجرای مراحل مورد نیاز، نتایج به دست آمدند. در جدول ۱ تنش تسلیم و استحکام نهایی حاصل از دو آزمایش کشش و اولین آزمایش ناگ با یکدیگر مقایسه شده‌اند؛ خطای آزمایش ناگ نسبت به آزمایش کشش به ترتیب در حدود ۸ و ۹٪ به دست آمده است.

ABI Analysis			
	P	hp	ht
1	106.47	0.58400E-05	0.87200E-05
2	199.22	0.10500E-04	0.14500E-04
3	301.46	0.15600E-04	0.20600E-04
4	452.25	0.23400E-04	0.29500E-04
5	602.54	0.29800E-04	0.36800E-04

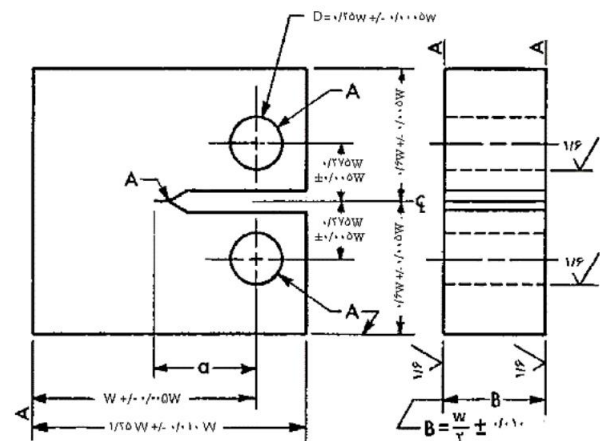
شکل ۱۳- داده‌های نخستین آزمایش ناگ بر روی فولاد ۴۳۴۰
آنیل شده در رابط کاربری (متریک)

در ادامه آزمون کشش بر روی نمونه‌هایی از پوسته پایین و بالایی فلپ لبه فرار بال یک هواپیما فرسوده، از جنس آلومینیوم 7075-T6 انجام گرفت. همانطور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، جهت انجام آزمون کشش بر اساس استاندارد ASTM-E8 نمونه‌هایی دمبلی شکل با سطح مقطع مستطیلی با اندازه استاندارد در مقیاس کامل تهیه شده‌اند. همچنین جهت برش دقیق نمونه‌ها از دستگاه وایرکات استفاده شده است.

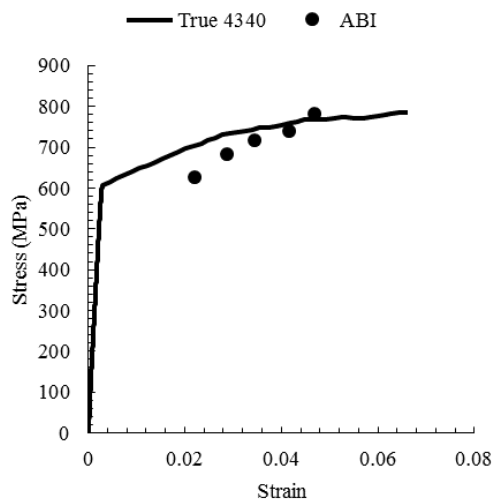


شکل ۱۰- نمونه استاندارد آماده شده جهت آزمون کشش

آزمون چقرمگی شکست بر روی نمونه‌هایی از بخش‌های پوسته زیرین بال یک هواپیما فرسوده، نزدیک به ارابه فرود، از جنس آلومینیوم 7075-T651 فورج شده و قسمت وسط محل اتصال دو بال چپ و راست به هم از همان جنس و همچنین یک شمش آلومینیومی خام از آلیاژ 7075-T651- ASTM-E399 در استاندارد انجام شده است. در نمونه‌های مختلفی برای آزمایش K_{IC} وجود دارد که در آنها یک پیش ترک تیز با استفاده از بار خستگی ایجاد گردیده است. در آزمایش‌های مربوط به این مقاله از نمونه آزمایش CT استفاده شده است. این نمونه آزمایش که متداولترین نمونه آزمایش تعیین K_{IC} است در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همه نمونه‌های آزمایش توسط دستگاه وایرکات برش داده شده‌اند.



شکل ۱۱- هندسه نمونه استاندارد CT



شکل ۱۴- نتایج نخستین آزمایش ناگ بر روی فولاد ۴۳۴۰
 آنیل شده در رابط کاربری (متریک)

	Value
K	0.97028E+09
n	0.91648E-01
K _{ijc}	0.18339E+09
S _Y	0.56221E+09
US	0.71117E+09

جدول ۱- مقایسه برخی پارامترهای حاصل از آزمایش کشش و ناگ در اولین آزمایش ناگ بر روی فولاد ۴۳۴۰ آنیل شده

پارامتر	آزمایش کشش	آزمایش ناگ	درصد خطا (%)
SY	۶۱۱/۳	۵۶۲/۳	-۸
US	۷۸۵/۶	۷۱۱/۱	-۹

شکل ۱۵- مقایسه بین منحنی تنش حقیقی- کرنش پلاستیک حقیقی حاصل از آزمایش کشش و نقاط حاصل از تحلیل اولین آزمایش بر روی فولاد ۴۳۴۰ آنیل شده

در جدول ۲ تنش تسلیم و استحکام نهایی حاصل از آزمایش کشش و دومین آزمایش ناگ با یکدیگر مقایسه شده‌اند. خطای آزمایش ناگ نسبت به آزمایش کشش در حدود ۹٪ به دست آمده است. در جدول ۳ تنش تسلیم و استحکام نهایی حاصل از دو آزمایش کشش و سومین آزمایش ناگ با یکدیگر مقایسه شده‌اند؛ خطای آزمایش ناگ نسبت به آزمایش کشش به ترتیب در حدود ۴ و ۱۴٪ به دست آمده است.

جدول ۴- مقایسه تنش‌های نمودار تنش-کرنش حقیقی حاصل از آزمایش کشش و اولین آزمایش ناگ

خطا (%)	تنش‌ها از آزمایش ناگ (مگاپاسکال)	تنش‌ها از آزمایش کشش (مگاپاسکال)
-۱۰/۸	۶۲۵/۹	۷۰۲/۳
-۶/۸	۶۸۳/۳	۷۳۳/۲
-۳/۶	۷۱۶/۸	۷۴۳/۹
-۲/۶	۷۳۸/۷	۷۵۸/۲
۱/۹۰	۷۸۲/۵	۷۶۸/۱

جدول ۲- مقایسه برخی پارامترهای حاصل از آزمایش کشش و ناگ در دومین آزمایش ناگ بر روی فولاد ۴۳۴۰ آنیل شده

پارامتر	آزمایش کشش	آزمایش ناگ	درصد خطا (%)
SY	۶۱۱/۳	۵۵۴/۴	-۹
US	۷۸۵/۶	۷۱۵/۹	-۹

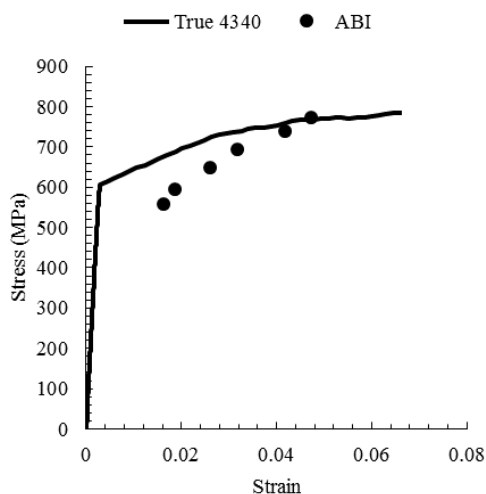
جدول ۳- مقایسه برخی پارامترهای حاصل از آزمایش کشش و ناگ در سومین آزمایش ناگ بر روی فولاد ۴۳۴۰ آنیل شده

پارامتر	آزمایش کشش	آزمایش ناگ	درصد خطا (%)
SY	۶۱۱/۳	۵۸۵/۷	-۴
US	۷۸۵/۶	۶۷۴/۶	-۱۴

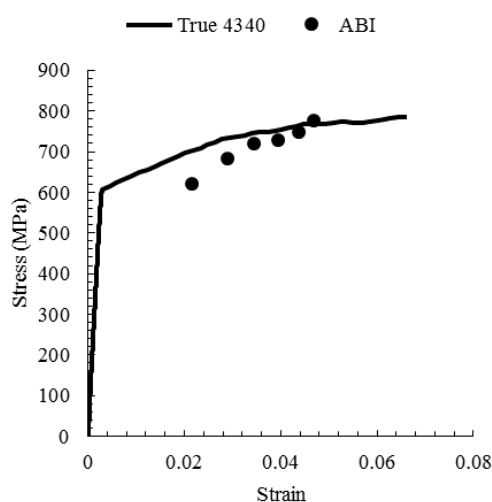
پس از شش مرتبه بارگذاری و باربرداری با استفاده از دستگاه سنناتام، شش نقطه تنش-کرنش، در آزمایش دوم به دست آمدند. به منظور مقایسه کیفی این داده‌ها با نمودار تنش-کرنش حاصل از آزمایش کشش، شکل ۱۶ رسم شده است. همچنین در جدول ۵ داده‌های مذکور به صورت عددی مقایسه شده‌اند.

پس از پنج مرتبه بارگذاری و باربرداری با استفاده از دستگاه سنناتام، پنج نقطه تنش-کرنش، در آزمایش اول به دست آمدند. به منظور مقایسه کیفی این داده‌ها با نمودار تنش-کرنش حاصل از آزمایش کشش، شکل ۱۵ رسم شد. همچنین در جدول ۴ داده‌های مذکور به صورت عددی مقایسه شده‌اند.

است که روش غیرمخرب نفوذ شبه استاتیکی می تواند به طور بالقوه برای بررسی میزان استحکام باقیمانده سازه های هواپیماهای فرسوده در ناوگان هوایی استفاده نمود.



شکل ۱۷- مقایسه بین منحنی تنش حقیقی- کرنش پلاستیک حقیقی حاصل از آزمایش کشش و نقاط حاصل از تحلیل سومین آزمایش بر روی فولاد ۴۳۴۰ آنیل شده



شکل ۱۶- مقایسه بین منحنی تنش حقیقی- کرنش پلاستیک حقیقی حاصل از آزمایش کشش و نقاط حاصل از تحلیل دومین آزمایش بر روی فولاد ۴۳۴۰ آنیل شده

جدول ۵- مقایسه تنش های نمودار تنش- کرنش حقیقی حاصل از آزمایش کشش و دومین آزمایش ناگ

خطا (%)	تنش ها از آزمایش کشش (مگاپاسکال)	تنش ها از آزمایش ناگ (مگاپاسکال)
-۱۱/۷	۶۱۹/۹	۷۰۲/۳
-۶/۹	۶۸۲/۳	۷۲۳/۲
-۳/۴	۷۱۹	۷۴۳/۹
-۳/۳	۷۲۸/۷	۷۵۳/۷
-۲/۲	۷۴۷/۱	۷۶۳/۵
۱/۲۰	۷۷۷/۲	۷۶۸/۱

جدول ۶- مقایسه تنش های نمودار تنش- کرنش حقیقی حاصل از آزمایش کشش و سومین آزمایش ناگ

خطا (%)	تنش ها از آزمایش کشش (مگاپاسکال)	تنش ها از آزمایش ناگ (مگاپاسکال)
-۱۷/۸	۶۸۰/۶	۵۵۹
-۱۳/۷	۶۸۹	۵۹۴/۶
-۱۰/۳	۷۲۳/۹	۶۴۹
-۶/۱	۷۳۹/۸	۶۹۴/۹
-۲/۶	۷۵۸/۲	۷۳۸
۰/۷	۷۶۸/۱	۷۷۳/۶

جدول ۷- مقایسه نتایج تنش تسلیم و نهایی روش تجربی و روش ناگ آلومینیوم ۷۰۷۵ خام و فرسوده

نوع قطعه	تنش تسلیم (مگاپاسکال)	تنش نهایی (مگاپاسکال)
خام	تجربی: ۴۶۲ روش ناگ: ۴۵۸	تجربی: ۵۸۲ روش ناگ: ۵۸۱
فرسوده ۱	تجربی: ۵۰۹ روش ناگ: ۴۹۸	تجربی: ۶۰۰ روش ناگ: ۶۰۵
فرسوده ۲	تجربی: ۵۲۳ روش ناگ: ۵۱۵	تجربی: ۶۲۸ روش ناگ: ۶۱۷
فرسوده ۳	تجربی: ۵۸۰ روش ناگ: ۵۷۲	تجربی: ۷۰۰ روش ناگ: ۶۹۳

پس از شش مرتبه بارگذاری و باربرداری با استفاده از دستگاه سنناتام، شش نقطه تنش- کرنش، در آزمایش سوم به دست آمدند. به منظور مقایسه کیفی این داده ها با نمودار تنش- کرنش حاصل از آزمایش کشش، شکل ۱۷ رسم شد. همچنین در جدول ۶ داده های مذکور به صورت عددی مقایسه شده اند.

همچنین مقایسه بین نتایج تنش تسلیم و نهایی روش تجربی با روش ناگ، آلومینیوم ۷۰۷۵ خام و فرسوده در جدول ۷ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می کنید تطابق خوبی بین نتایج روش غیر مخرب ناگ و نتایج تجربی دیده می شود در جدول ۸، مقایسه بین نتایج چقرمگی شکست روش تجربی با روش غیرمخرب ناگ آلومینیوم ۷۰۷۵ خام و فرسوده نشان داده شده است. نتایج حاصل از دو روش حاکی از آن

یک دستگاه تست کشش ۱۵ تن انجام پذیرفته است چنانچه سامانه‌ای مختص این روش مجهز به سنسورهای اندازه‌گیری دقیق‌تر ساخته شود نتایج می‌تواند بهتر شود. نکته مهم این است که این خطا در برخی نقاط تا ۰/۷٪ کاهش یافته است که خطای بسیار کوچکی است.

با در نظر گرفتن همه عوامل موثر و شرایط آزمایش، آزمایش ناگ به منظور دستیابی به خواص مکانیکی بسیار مناسب است. البته با توجه به سه‌بعدی بودن تنش در محل بارگذاری و ایجاد تنش‌های کششی و فشاری به صورت همزمان، بهتر است رفتار تنش-کرنش قطعه در کشش و فشار، چندان متفاوت از هم نباشند.

۷- فهرست علائم

δ	متغیر وابسته به توسعه یافتگی ناحیه نفوذ
ϵ_f^*	کرنش بحرانی شکست
ϵ_p	کرنش پلاستیک واقعی
σ_e	تنش حقیقی
σ_y	تنش تسلیم
ϕ	متغیر واسط
d_p	قطر تو رفتگی
D	قطر نفوذ گوی
P	بار نفوذ اعمال شده
h_p	عمق نفوذ
β_m	ضریب ثابت نوع ماده
α_m	پارامتر متناسب با حساسیت نرخ کرنش
E_{ind}	مدول الاستیکی نفوذ کننده
E_{spec}	مدول الاستیکی ماده
K	ضریب استحکام
n	توان کرنش‌سختی
l_0^*	طول مشخصه

جدول ۸- مقایسه نتایج چقرمگی شکست روش تجربی و روش ناگ آلومینیوم ۷۰۷۵ خام و فرسوده

نوع قطعه	تنش تسلیم (مگاپاسگال)		تنش نهایی (مگاپاسگال)		چقرمگی شکست
	روش ناگ	روش ناگ	تجربی	ناگ	
خام	۴۵۸	۵۸۱	۲۹	۲۷/۵۳	
فرسوده ۱	۵۶۶	۵۹۶	۳۰/۵۶	۲۹/۴۲	
فرسوده ۲	۵۸۴	۶۰۳	۳۲/۶۹	۳۱/۹۸	

۶- نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج آزمایش و مقایسه نتایج آزمایش کشش و ناگ، همچنین مقایسه نتایج کد با نتایج مقالات، نتایج ذیل ارائه می‌گردد:

۱- نتایج حاصل از دو روش مخرب تجربی و غیرمخرب ناگ حاکی از آن است که روش غیرمخرب نفوذ شبه استاتیکی می‌تواند به طور بالقوه برای بررسی میزان استحکام باقیمانده سازه‌های هواپیماهای فرسوده در ناوگان هوایی استفاده نمود.

۲- آزمایش ناگ با خطای خوبی در حدود حداکثر ۹٪ نسبت به آزمایش کشش، تنش تسلیم را محاسبه نمود که با توجه به مشکلاتی چون نحوه آویل کردن، باربرداری برای ساخت نمونه کشش، تاثیر سنبلاده بر روی سطح نمونه ناگ و ... خطای مناسبی به نظر می‌رسد.

۳- خطای محاسبه استحکام نهایی حداکثر ۱۴٪ بود که با توجه به شرایطی که برای تنش تسلیم ذکر شد خطای زیادی به نظر نمی‌رسد.

۴- با توجه به غیرمخرب بودن روش، می‌توان در صورتی که عملیات حرارتی و مکانیکی سطحی در قطعه صورت نگرفته باشد از آزمایش ناگ به خوبی استفاده کرد. این شرط در حالی است که از آزمایش کشش نیز نمی‌توان ارزیابی خواص مکانیکی را در نقطه یا نقاط کوچک انجام داد.

۵- بارگذاری در نیروهای کوچک، در حدود ۱۷/۸٪ خطا در محاسبه نقطه تنش-کرنش حقیقی ایجاد کرد. در واقع با توجه به معیار بودن آزمایش کشش، این نتیجه حاصل شده است. اظهار نظر قطعی در مورد زیاد بودن خطای آزمایش ناگ، به معنی چشم‌پوشی بر این واقعیت است که پروسه باربرداری در آزمایش کشش، تاثیرات مکانیکی زیادی بر روی سخت‌شوندگی دارد و این تاثیرات در آزمایش ناگ وجود ندارند. لازم به ذکر است آزمایشات انجام شده در این پژوهش توسط

۸- مراجع

- Aircraft Structure and Operational Readiness. Materials 2021, 14, 2414.
- [15] THE FEASIBILITY OF USING X-RAY INDUCED ACOUSTIC COMPUTED TOMOGRAPHY FOR NON-DESTRUCTIVE TESTING OF AIRCRAFT STRUCTURAL, shareok.org, 2020.
- [16] K. Murty, M. Mathew, P. Miraglia, V. Shah, and F. M. Haggag, Non-Destructive Evaluation of deformation and fracture properties of materials using stress-Strain Microprobe, in MRS Proceedings, p. 327, 1997.
- [17] F. M. Haggag, In-Situ Measurements of Mechanical Properties Using Novel Automated Ball Indentation System, in Small Specimen Test Techniques Applied to Nuclear Reactor Vessel Thermal Annealing and Plant Life Extension, ed: ASTM International, pp. 27-27-18, 1993.
- [18] F. M. Haggag, R. K. Nanstad, J. T. Hutton, D. L. Thomas, and R. L. Swain, Use of automated ball indentation testing to measure flow properties and estimate fracture toughness in metallic materials, Applications of Automation Technology to Fatigue and Fracture Testing, ASTM STP, vol. 1092, pp. 188-208, 1990.
- [19] Test Methods for Automated Ball Indentation (ABI) Testing of Metallic Samples and Structures to Determine Tensile Properties and Stress-Strain Curves.
- [20] R. K. Pandey and S. Banerjee, Strain induced fracture in low strength steels, Engineering Fracture Mechanics, vol. 10, pp. 817-829, 1978.
- [21] R. O. Ritchie, W. L. Server, and R. A. Wullaert, Critical fracture stress and fracture strain models for the prediction of lower and upper shelf toughness in nuclear pressure vessel steels, Metallurgical Transactions A, vol. 10, pp. 1557-1570, 1979.
- [22] F. Haggag, W. Reuter, and W. Server, Recovery of Fracture Toughness of Irradiated Type 347 Stainless Steel Due to Thermal Stress Relief: Metallographic and Fractographic Studies, in Proceedings of the 2nd International Symposium on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems-Water Reactors, pp. 509-514, 1985.
- [23] F. Y. M. Haggag and G. E. Lucas, Determination of lüders strains and flow properties in steels from hardness/microhardness tests, Metallurgical Transactions A, vol. 14, pp. 1607-1613, 1983.
- [1] E. Meyer and V. Z., Dtsch. Ing., vol. 52, ed: Ing, pp. 740-835, 1908.
- [2] D. Tabor, The hardness of metals: Oxford university press, 2000.
- [3] K. Sharma, V. Bhasin, and A. Ghosh, Property Estimation with Automated Ball Indentation Using Artificial Neural Network and Finite Element Simulation, JJMIE, vol. 4, 2010.
- [4] F. M. Haggag, R. K. Nanstad, J. T. Hutton, D. L. Thomas, and R. L. Swain, The use of automated ball indentation testing to measure flow properties and estimate fracture toughness in metallic materials, in ASTM Symposium on the Application of Automation Technology to Fatigue and Fracture Testing, Kansas City, Missouri, 1989.
- [5] F. Haggag and R. Nanstad, Estimating fracture toughness using tension or ball indentation tests and a modified critical strain model, vol. 170, ed: PVP, pp. 41-46, 1989.
- [6] H. K. Khandelwal, K. Sharma, and R. Chhibber, Mechanical Property Estimation of Similar Weld using Ball Indentation Technique, Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering, vol. 11, p. 1095, 2012.
- [7] O. Trudonoshyn, M. Puchnin, and O. Prach, Use Of The ABI Technique To Measure The Mechanical Properties Of Aluminium Alloys: Effect Of Heat-Treatment Conditions On The Mechanical Properties Of Alloys, Materiali in tehnologije, vol. 50, pp. 427-431, 2016.
- [8] M. Puchnin, O. Trudonoshyn, and O. Prach, Use Of The ABI Technique To Measure The Mechanical Properties Of Aluminium Alloys: Effect Of Chemical Composition On The Mechanical Properties Of The Alloys, Materiali in tehnologije, vol. 50, pp. 247-252, 2016.
- [9] A. Shedbale, I. Singh, B. Mishra, and K. Sharma, Evaluation of mechanical properties using spherical ball indentation and coupled finite element-element-free galerkin approach, Mechanics of Advanced Materials and Structures, vol. 23, pp. 832-843, 2016.
- [10] Mahendra K Samal, A Syed, RN Khatri and J Chattopadhyay, Study of plastically deformed region underneath the ball in indentation tests and evaluation of mechanical properties of materials through finite element simulation and a hybrid algorithm, journal of Mechanical Engineering Science, Vol. 0(0) 1-14, 2020.
- [11] J. Ganesh Kumar, G.V. Prasad Reddy, Alphy George, A. Saikumar, R. Mythili, P. Anil Kumar, Arup Das Gupta, M. Vasudevan, Evaluation of tensile properties of thermally aged 316LN stainless steel with varying nitrogen content using ABI technique, Materials Science & Engineering A, 806 (2021) 140819.
- [12] Mahmoud Gholami, Hamidreza Zarei, Sohrab Astaraki, Experimental Investigation of Residual Strength of Aged Aircraft Structures, Journal of Aeronautical Engineering, Vol 19 (2):66-76; 2017.
- [13] National Research council; aging of U.S Air force Aircraft final report National Academy Press, Washington, D.C, 1997.
- [14] Venugopal, A.; Mohammad, R.; Koslan, M.F.S.; Sayd Bakar, S.R.; Ali, A. The Effect of Tropical Environment on Fatigue Failure in Royal Malaysian Airforce (RMAF)