



بررسی تجربی ضربه کم سرعت تکراری بر روی سازه گلار با سطوح انرژی مختلف

سید محمد رضا خلیلی^۱، رحمت الله قاجار^۲، مهدی یارمحمد توسکی^۳، رنه آلدریستن^۴

^۱ استاد، مرکز عالی تحقیقات مواد و سازه‌های پیشرفته و هوشمند دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیر، تهران

^۲ استاد، آزمایشگاه خواص مکانیکی دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیر، تهران

^۳ دانشجوی دکترای مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیر، تهران

^۴ دانشیار، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه پلی تکنیک دلفت، دلفت

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۰۹/۲۹؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۴/۰۱/۲۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۵/۰۱

چکیده

در این تحقیق، بررسی تجربی ضربه کم سرعت تکراری روی سازه گلار با استفاده از دستگاه وزنه افتان انجام می‌گیرد. پس از اصابت ضربه اول بر روی صفحه، مقدار انرژی ضربه دوم کاهش، ولی در تمام ضربات بعدی این مقدار ثابت می‌ماند. آسیب ناشی از ضربات تکراری با استفاده از بازبینی معمولی و اسکن-C، مورد بررسی قرار می‌گیرد. با اعمال ضربه اول روی صفحه، سه حالت بدون آسیب، آسیب مختصر و آسیب شدید رخ می‌دهد. تعداد ضربه تا وقوع پدیده سوراخ‌شدن با کاهش انرژی ضربه دوم افزایش می‌یابد. حد آستانه انرژی ضربه به عنوان ماکزیمم انرژی در ضربات تکراری پس از ضربه اول تعریف می‌شود که سبب هیچ آسیبی در نمونه نگردد. برای انرژی ضربات پیرو بیشتر از حد آستانه، انرژی ضربه اثر ضربات تکراری مهم است و برای مقادیر کمتر از حد آستانه انرژی، ضربات پیرو، نقش بارزی در ایجاد آسیب ندارند.

کلمات کلیدی: ضربه تکراری؛ گلار، اسکن-C؛ انرژی آستانه؛ سوراخ شدن.

Experimental investigation of repeated low velocity impact on GLARE with various energy levels

S.M.R. Khalili^{1,*}, R. Ghajar², M. Yarmohammad Tooski³, R. Alderliesten⁴

¹ Prof, Center of Excellence for Research in Advanced Materials and Structure, Mech. Eng., K.N.Toosi Univ. of Tech., Tehran, Iran

² Prof, Mechanical Properties Research Laboratory, Mech. Eng., K.N.Toosi Univ. of Tech., Tehran, Iran

³ PhD Student, Mech. Eng., K.N.Toosi Univ. of Tech., Tehran, Iran

⁴ Asso, Aero. Eng., TUDelft Univ., Delft, Netherlands

Abstract

In this study, an experimental investigation of repeated low velocity impact is performed on GLARE using drop weight testing machine. After the first impact on the plate, the second impact energy decreases and stays constant until the last impact. Damage due to repeated impact is investigated using visual inspection and C-scan. Three categories namely, no damage, small damage and serious damage are happened as a result of the first impact on the plate. The number of impacts required for the penetration is increased with decrease of the second impact energy. The threshold limit energy is defined as the maximum impact energy in repeated impact after the first impact which causes no damage on the specimen. For the successive impact energy larger than the threshold limit energy, the number of impacts becomes important, while for the successive impacts energies smaller than threshold limit energy, the number of impact has inconsiderable effect on damage occurrence.

Keywords: Repeated impact, Glare5, C-scan, Threshold energy, penetration.

۱- مقدمه

کامپوزیت‌های الیاف-فلز (FML) جزء مواد هیبریدی محسوب شده، از ترکیب لایه‌های نازک فلز و کامپوزیت پیش‌ساخته با الیاف تقویت‌شونده تشکیل می‌شوند. هدف از طراحی مهندسی برای این مواد، ترکیب بهترین مشخصات برای فلز و کامپوزیت با الیاف تقویت‌شونده است [۱-۳]. FMLها به دو نوع تقسیم‌بندی می‌شوند: (۱) گلار^۲ ترکیبی از کامپوزیت با الیاف تقویت‌شونده شیشه از نوع S و R، (۲) آرال^۳ ترکیبی از آلومینیم با کامپوزیت الیاف آرامید است. FMLهای هیبریدی نسبت به فلز و کامپوزیت با الیاف تقویت‌شونده مزیت داشته، از خواص مکانیکی خوبی برخوردار است؛ بطوری‌که خواص مکانیکی آن هم از فلز و هم از کامپوزیت با الیاف تقویت‌شونده بهتر است [۴-۶]. FMLها بخاطر مزیت‌های فراوان‌شان، اهمیت گسترده‌ای در صنایع فضایی و هوافضا بدست آورده‌اند که از مزیت‌های آن می‌توان به چگالی کم، مقاومت بالا، حد تحمل آسیب بالا در رشد ترک خستگی و ضربه کم سرعت و سرعت بالا، مقاومت به ضربه بالا و مقاومت به خوردگی اشاره کرد [۷-۸].

چندین مطالعه روی مقاومت ضربه گلار بوسیله فلات و همکارانش انجام شده است [۹-۱۱]. تحقیقات نشان داده که گلار، به تشکیل ناحیه‌های بزرگ از آسیب درونی تحت بار ضربه حساس نیست. بطور عمده آسیب ضربه در گلار، در ناحیه کوچکی پیرامون محل ضربه اتفاق می‌افتد. اندازه آسیب درونی همیشه از اندازه تغییر شکل پلاستیسیته نمایان شده روی آلومینیم گلار کوچک‌تر است [۱۲-۱۳]. از آنجایی که گلار از ترکیب آلومینیم و کامپوزیت با الیاف شیشه ساخته می‌شود با توجه به چیدمان کامپوزیت، دسته‌های مختلفی برای آن در نظر گرفته می‌شود؛ برای مثال در گلار ۱، گلار ۲، گلار ۳ و گلار ۵، کامپوزیت به ترتیب با چیدمان [0/0]، [90/90]، [0/90] و [0/90/90/0] بین دو لایه آلومینیم قرار می‌گیرد و همچنین آرال ۳ که از ترکیب آلومینیم و کامپوزیت با الیاف تقویت‌شونده آرامید تشکیل شده، کامپوزیت با چیدمان [0/90] بین لایه‌های آلومینیم قرار دارد. با مقایسه

حد تحمل آسیب آرال ۳ با گلارهای مختلف مشخص گردیده که گلار ۱، حد تحمل آسیب بالاتری از آرال ۳ دارد و همچنین گلار ۳، مقاومت به ضربه بالاتری از گلار ۲ دارد [۱۴]. با بررسی اثر ضخامت‌های مختلف گلار ۵، تحت ضربه سرعت پایین مشخص شد که با افزایش ضخامت پانل قابلیت جذب انرژی ضربه افزایش می‌یابد. به علاوه انرژی آستانه ترک در فلز به صورت سهمی‌گون نسبت به ضخامت پانل تغییر می‌کند [۱۵]. همچنین مقاومت آسیب FML با اندازه‌گیری عمق گودی، پهنای ناحیه آسیب دیده و حداقل انرژی مورد نیاز برای ترک ماتریس مشخص می‌شود. آسیب بصورت ترک در FML در سطح پایینی آلومینیم اتفاق می‌افتد که بصورت موازی در جهت الیاف گسترش می‌یابد [۱۶].

با وجود مطالعات گسترده در مورد ضربه سرعت پایین روی صفحات FML، مطالعات کمی روی ضربه تکراری سرعت پایین روی مواد هیبریدی از نوع FML انجام گرفته است. راجکومار و همکارانش [۱۷-۱۸]، کاهش خواص در اثر ضربه تکراری سرعت پایین روی FML با الیاف کربن و شیشه را مورد بررسی قرار دادند. نتایج، نشان داده که FML با الیاف شیشه، دارای جذب انرژی بهتری نسبت به FML با الیاف کربن است؛ زیرا با افزایش تعداد ضربه روی نمونه، الیاف کربن اجازه پیشروی ترک‌ها در بین سازه را داده، ناحیه آسیب دیده افزایش پیدا می‌کند. رشد آسیب در ضربه تکراری کم سرعت روی گلار ۵ توسط مورینیر و همکاران [۱۹]، مورد بررسی قرار گرفته است، به طوری‌که انرژی ضربه برای همه ضربات ثابت در نظر گرفته شده بود. در این تحقیق، مشاهده شده که سفتی ورق بخاطر تغییر شکل و آسیب با افزایش تعداد ضربه تغییر می‌کند. لایه‌های شیشه/اپوکسی با مقاومت کششی الاستیک بالا، می‌توانند علی‌رغم رشد تورق در مجاورت ناحیه ضربه‌خورده، چندین ضربه قبل از سوراخ‌شدن را تحمل کنند. همچنین اثر فاصله در ضربه کم سرعت تکراری روی گلار ۵ توسط یارمحمدتوسکی و همکاران [۲۰]، مورد بررسی قرار گرفته است. مشخص شده است که آلومینیم، نقش مهمی در ضربه تکراری روی گلار دارد. قبل از جوانه‌زنی ترک در آلومینیم، کاهش فاصله سبب افزایش سفتی ورق و افزایش نیروی تماسی و کاهش زمان تماس می‌شود. با تشکیل ترک در فلز، کاهش در فاصله محل ضربه، سبب کاهش سفتی ورق که

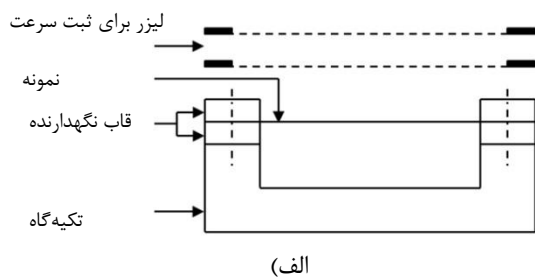
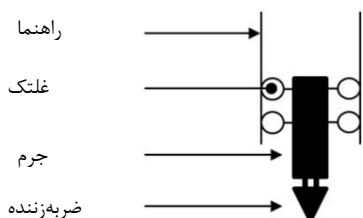
¹ FML (Fiber Metal Laminates)

² GLARE (Glass Laminate Aluminum Reinforced)

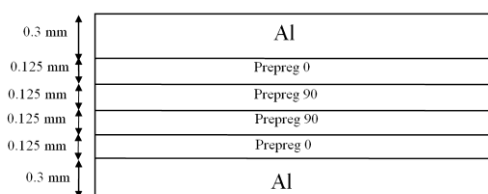
³ ARALL (Aramid fiber Aluminum Reinforced)

۱۲۰ درجه سانتیگراد بوده، پس از خنک شدن، نمونه‌ها با استفاده از دستگاه برش به ابعاد مورد نظر برش خورده و برای آزمایش ضربه آماده گردیدند.

ضخامت هر لایه کامپوزیت پیش آغشته، ۰/۱۲۵ میلی‌متر و ضخامت هر لایه آلومینیم، ۰/۳ میلی‌متر و در مجموع ضخامت گلار ۵، ۱/۱ میلی‌متر است. از نمونه‌های مستطیلی با ابعاد ۷۵ میلی‌متر در ۱۲۵ میلی‌متر با شرایط مرزی گیردار-گیردار برای آزمایش ضربه تکراری استفاده شده است. بعد از هر ضربه با استفاده از یک مانع فلزی از ضربه‌های بعدی جلوگیری گردیده است. از ضربه زننده مخروطی با جرم ۱/۰۵۸ کیلوگرم استفاده شده که در شکل ۱ شماتیک دستگاه ضربه افتان، نمای جانبی و چیدمان لایه‌های نمونه نشان داده شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۱- الف) شماتیک دستگاه ضربه افتان ب) شماتیک جانبی و چیدمان لایه‌ها در نمونه گلار ۵

خود سبب کاهش در نیروی تماسی و افزایش در زمان تماس می‌شود. همچنین برای بررسی پارامتر آسیب و فاصله، تنها یک نقطه میانی کافی است؛ بطوری‌که محل نقطه میانی در تشکیل پیوند آسیب مهم است.

در دو تحقیق اخیر [۱۹-۲۰] ضربات تکراری با انرژی یکسان روی صفحه FML اصابت و از ضربه اول تا ضربه آخر، انرژی ضربه یکسان بوده است. حال این سوال مطرح می‌شود، اگر پس از ضربه اول انرژی ضربه دوم کاهش یابد، پاسخ ورق گلار چگونه است و تا چه محدوده‌ای این کاهش انرژی ضربه موثر است. بدین منظور در این مقاله پس از ضربه اول، انرژی ضربه را کاهش و از ضربه دوم تا ضربه آخر، مقدار آن یکسان است. ضربات تکراری با سطوح انرژی مختلف برای ضربات دوم تا آخر انجام و با استفاده از ثبت داده‌ها، به بررسی پاسخ صفحه پرداخته شده است. همچنین با استفاده از اسکن C-آسیب ناشی از ضربات تکراری، مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- روش انجام آزمایش

تمامی آزمایش‌های ضربه با دستگاه ضربه افتان در دانشگاه هوافضا دلفت^۱ کشور هلند انجام شده است. از گلار ۵ (GLARE 5-2/1-0.3)، به عنوان ماده هیبریدی از نوع FML استفاده شده است. GLARE 5-2/1-0.3، یعنی اینکه از گلار ۵ استفاده شده که از دو لایه آلومینیم و یک لایه کامپوزیت که چیدمان لایه کامپوزیت به صورت [0/90/90/0] بوده، ضخامت هر لایه آلومینیم ۰/۳ میلی‌متر است. کامپوزیت از پیش آغشته و الیاف شیشه نوع S2 با اپوکسی FM94 ساخته شده است و همچنین از آلومینیم 2024T3 نیز، برای فلز آن استفاده گردیده است.

گلار ۵ با استفاده از تکنیک لایه‌چینی دستی ساخته شده است. در ابتدا لایه آلومینیم با راستای نورد ۰ درجه قرار داده و سپس چهار لایه کامپوزیت پیش آغشته بترتیب، در راستای ۰، ۹۰، ۹۰ و ۰ روی آلومینیم قرار می‌گیرد و در نهایت، لایه آلومینیم بالایی با همان راستای نورد روی کامپوزیت پیش آغشته در راستای صفر قرار گرفته است. سپس نمونه‌ها در دستگاه اتوکلاو گذاشته شده، در زمان سه ساعت با فشار بالای ماکزیمم ۶ بار پخته شده است، بطوری‌که دمای پخت

^۱ TuDelft

جدول ۱- انرژی ضربه اول و ضربه دوم تا آخر برای نمونه‌های

کد نمونه	مختلف	
	انرژی ضربه اول (ژول)	انرژی ضربه دوم تا آخر (ژول)
DW10	۱۷/۵۹	-
DW20	۷/۰۱	-
DW30	۵/۱	-
DW40	۳/۹۶	-
DW11	۱۷/۵۹	۱۱/۷۴
DW12	۱۷/۵۹	۸/۲۷
DW13	۱۷/۵۹	۴/۷۱
DW14	۱۷/۵۹	۳/۲۲
DW15	۱۷/۵۹	۲/۴۸
DW16	۱۷/۵۹	۱/۳۴
DW27	۷/۰۱	۶/۰۰
DW28	۷/۰۱	۵/۰۱
DW29	۷/۰۱	۳/۹۶

فرکانسی دستگاه بین ۰/۵ تا ۳۰ مگا هرتز و ماکزیمم سرعت حرکت تراگذار ۴۰۰ میلی‌متر بر ثانیه است. با بررسی تصاویر اسکن-C، تحت ضربه اول و تکراری روی گلار ۵ سه دسته زیر از حالت آسیب شامل:

NVID^۳: هیچ آسیبی روی نمونه دیده نمی‌شود و تنها گودی نمایان است و در نتایج اسکن-C نیز، آسیبی دیده نمی‌شود (بدون آسیب).

BVID^۴: هیچ آسیبی روی نمونه دیده نمی‌شود، اما آسیب در تصویر اسکن-C قابل مشاهده است (آسیب مختصر).

CVID^۵: آسیب روی نمونه و تصویر اسکن-C، به وضوح قابل نمایان است (آسیب شدید).

حاصل می‌شود که در بخش‌های بعدی در مورد این سه دسته بحث می‌شود. همچنین با استفاده از نتایج اسکن-C، علاوه بر ناحیه آسیب، مقدار آسیب از نرم‌افزار ALIS بدست آمده و طول، عرض و مساحت ناحیه آسیب دیده محاسبه می‌شود.

۳- ضربه اول بر روی گلار ۵

در ابتدا پاسخ ورق FML از نوع گلار ۵ تحت ضربه اول با انرژی ضربه‌های مختلف، مورد بررسی قرار می‌گیرد. ضربه بر روی گلار ۵ با انرژی ۳/۹۶، ۷/۰۱ و ۱۷/۵۹ ژول انجام می‌شود که بترتیب، با حالت الف، ب و ج نامگذاری می‌شود. شکل ۲، پاسخ نیرو- زمان ورق را برای انرژی‌های مختلف نشان می‌دهد؛ همچنین نمای جلوی صفحه ضربه خورده، پشت صفحه ضربه خورده و نتایج اسکن-C، برای حالت‌های الف، ب و ج در شکل ۳ نشان داده شده است. برای انرژی ضربه ۳/۹۶ و ۷/۰۱ ژول (حالت الف و ب) روی نمونه گودی دیده می‌شود و نمونه در انرژی ضربه ۱۷/۵۹ ژول (حالت ج) ترک برداشته، بطوری که سیمی به قطر ۰/۳ میلی‌متر را می‌توان از آن عبور داد که در اصطلاح، "فرورفتن" اتفاق افتاده است. همانطور که در شکل ۲ مشخص است، برای حالت‌های الف و ب با افزایش انرژی ضربه نیروی ماکزیمم تماسی افزایش و زمان تماس کاهش می‌یابد.

آزمایش ضربات تکراری با انرژی‌های متفاوت انجام شده است. چهار انرژی ضربه اول ۱۷/۵۹، ۷/۰۱، ۵/۱ و ۳/۹۶ ژول برای نمونه‌ها در نظر گرفته شده است. پس از اعمال ضربه اول روی نمونه، انرژی ضربه دوم کمتر از ضربه اول در نظر گرفته شده، ولی در تمام ضربات بعدی این انرژی ثابت باقی می‌ماند. جدول ۱، کدگذاری نمونه‌ها همراه با انرژی ضربه اول و ضربه دوم تا آخر را برای نمونه‌های مختلف ارائه می‌کند. در کدگذاری نمونه‌ها علامت اختصاری DW، به آزمایش ضربه افتان (Drop Weight) برمی‌گردد. عدد اول پس از DW معرف انرژی ضربه اول و عدد دوم، بیانگر انرژی ضربه دوم تا آخر است. برای مثال، در DW15 عدد 1 مربوط به انرژی ضربه اول برابر ۱۷/۵۹ ژول و عدد 5، مربوط به انرژی ضربات دوم تا آخر بوده که انرژی آن ۲/۴۸ ژول است. DW40 یعنی، انرژی ضربه اول ۳/۹۶ ژول و عدد دوم 0 یعنی، ضربه تکراری ندارد و تنها تحت ضربه اول قرار گرفته است. با روش تست غیر مخرب اسکن-C آسیب نمونه‌ها بعد از ضربه، مورد بررسی قرار می‌گیرد. از روش عبوری^۱ در دستگاه اسکن-C، دانشگاه پلی‌تکنیک دلفت استفاده شده، بطوری که تراگذار^۲ فراصوتی با فرکانس ۱۰ مگا هرتز بکار گرفته شده است. محدوده

^۳ NVID (None Visible Impact Damage)

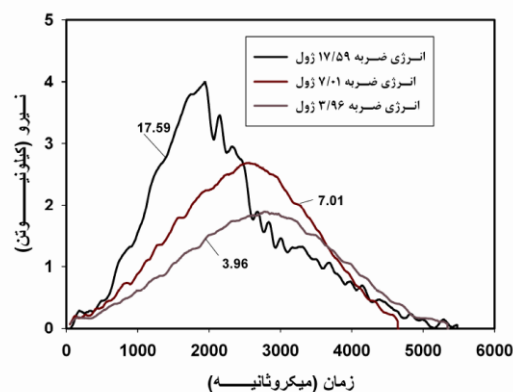
^۴ BVID (Barely Visible Impact Damage)

^۵ CVID (Celerly Visible Impact Damage)

^۱ Transmission

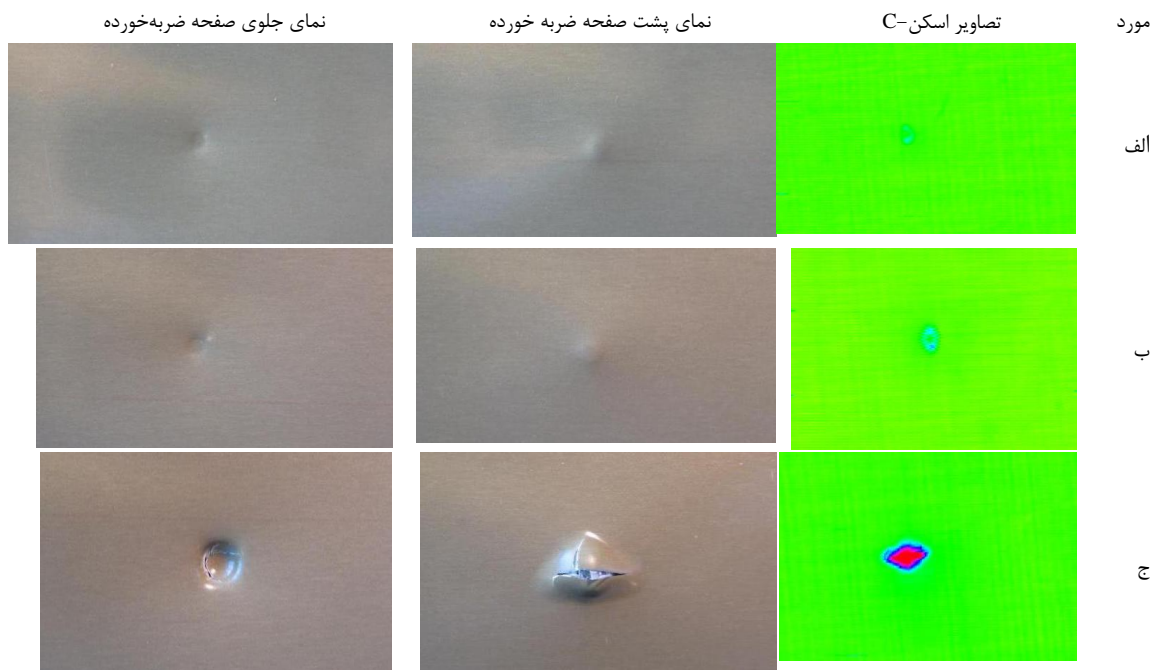
^۲ Transducer

دیده می‌شود که از آن می‌توان صرف‌نظر کرد. در حالت ب همانند حالت الف، در نمای جلوی صفحه ضربه خورده و نمای پشت صفحه ضربه خورده گودی دیده می‌شود، با این تفاوت که عمق گودی در این حالت افزایش می‌یابد؛ ولی در نمای اسکن-C آسیب مشاهده می‌شود؛ بنابراین در حالت الف و ب، بخاطر بدون آسیب و مختصر بودن آسیب نمونه‌ها بترتیب NVID و BVID رخ داده است. در حالت ج، روی نمونه ترک محیطی دیده می‌شود؛ در حالی که ترک در نمای پشت صفحه ضربه خورده مستقیم یا صاف بوده که از وسط آن عمود به بیرون منشعب شده است و دهانه ترک باز شده است. در نمای اسکن-C، آسیب نمایان است که در محل ضربه آسیب شدیدتر و با دور شدن از آن آسیب، کاهش می‌یابد. از آنجایی که در حالت ج آسیب شدید بوده، CVID بر روی نمونه اتفاق افتاده است.



شکل ۲- تاریخچه نیرو- زمان ضربه اول با انرژیهای مختلف

در حالت ج همانند قبل نیروی ماکزیمم تماس، بخاطر افزایش انرژی ضربه افزایش یافته، ولی زمان تماس بخاطر وجود آسیب در نمونه افزایش می‌یابد. در شکل ۳، برای حالت الف در نمای جلوی صفحه ضربه خورده، نمای پشتی آن تنها گودی دیده می‌شود و در نمای اسکن-C، آسیب بسیار جزئی

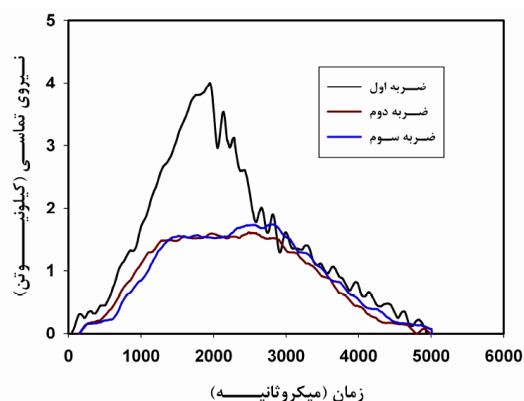


شکل ۳- نمای جلوی صفحه ضربه خورده و پشت صفحه ضربه خورده و نتایج تصویر اسکن-C برای ضربه اول با انرژیهای مختلف

هنگامی که ضربه اول با انرژی ۷/۰۱ ژول انجام می‌شود، BVID روی نمونه اتفاق می‌افتد. در این حالت، سوراخ شدن بعد از شانزده ضربه برای ضربات پیرو با انرژی ضربه ۶ ژول اتفاق می‌افتد، درحالی‌که بعد از چهار ضربه برای انرژی ضربه، ۵/۱ ژول برای ضربات پیرو سوراخ شدن اتفاق می‌افتد.

۴-۱- پاسخ صفحه تحت انرژی ضربات پیرو

با اعمال ضربه با انرژی ۱۷/۵۹ ژول روی نمونه CVID اتفاق می‌افتد (حالت ج شکل ۳). از ضربه دوم به بعد، مقدار انرژی ضربه کاهش داده می‌شود و ضربات پیرو با انرژی ۴/۷۱ ژول روی نمونه انجام می‌گیرد. با اعمال دو ضربه پس از ضربه اول روی نمونه سوراخ شدن اتفاق می‌افتد. شکل ۵، پاسخ نیرو-زمان برای انرژی ضربه اول ۱۷/۵۹ ژول و ضربات پیرو با انرژی ۴/۷۱ ژول را نشان می‌دهد. در ضربه اول با انرژی مذکور پس از ۲۰۰۰ میکروثانیه به نیروی تماسی ماکزیمم رسیده، پس از نیروی تماسی ماکزیمم در تاریخچه نیرو-زمان افت سفتی مشاهده می‌شود؛ بطوری‌که از زمان نیروی تماسی ماکزیمم تا زمان جدایش ضربه‌زننده ۳۰۰۰ میکروثانیه طول می‌کشد و روند باربرداری و بارگذاری به دلیل ایجاد و پیشروی آسیب متفاوت است.

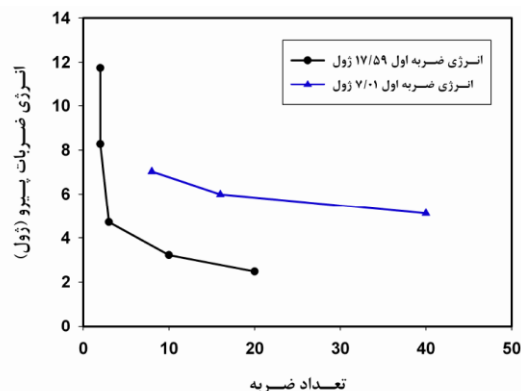


شکل ۵- تاریخچه نیرو-زمان برای ضربه اول با انرژی ۱۷/۵۹ ژول و ضربات پیرو با انرژی ۴/۷۱ ژول

با اعمال ضربه دوم با انرژی ضربه به مقدار ۴/۷۱ ژول به خاطر افت انرژی ضربه و بازشدگی ترک در نمونه نیروی تماسی ماکزیمم کاهش می‌یابد؛ ولی زمان تماس تقریباً ثابت است. با انجام ضربه سوم با انرژی ۴/۷۱ ژول در نمونه، ترک‌ها

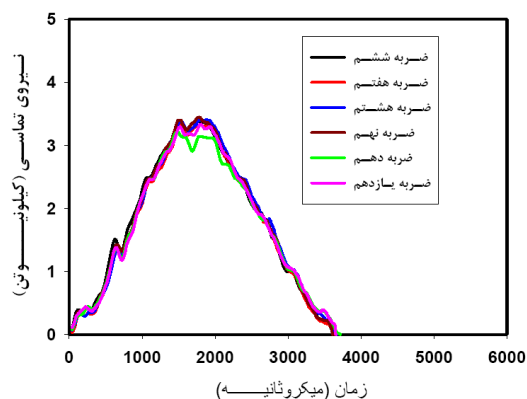
۴- ضربات پیرو با انرژی ثابت

همانطور که ذکر شد، با اعمال ضربه اول روی نمونه سه حالت BVID، CVID و NVID اتفاق می‌افتد. بدین منظور برای بررسی حالت‌های مذکور، نمونه‌ها طوری انتخاب شده‌اند که برای هر نمونه انرژی ضربه اول یکسان بوده، برای ضربات پیرو، انرژی ضربه کاهش یافته، از ضربه دوم تا ضربه آخر، مقدار انرژی در ضربات پیرو ثابت باقی می‌ماند. از آنجایی که مقدار انرژی ضربه دوم تا ضربه آخر یکسان است، ضربه دوم تا ضربه آخر به عنوان ضربات پیرو معرفی می‌شوند. شکل ۴، نمودار ضربات پیرو در برابر تعداد ضربه برای ضربه‌های اول مختلف تا وقوع پدیده سوراخ شدن روی نمونه را نشان می‌دهد. پدیده سوراخ شدن حالتی در نظر گرفته می‌شود که با چشم غیر مسلح از پشت نمونه بتوان ضربه‌زننده را مشاهده کرد (قطر سوراخ ایجاد شده در نمونه ۲ میلی‌متر باشد). مقادیر انرژی ضربه اول بترتیب، ۱۷/۵۹، ۷/۰۱ و ۳/۹۶ ژول می‌باشند. با اعمال ضربه اول با انرژی ۱۷/۵۹ ژول روی نمونه فرورفتن اتفاق می‌افتد که همان حالت CVID است. با انرژی ضربه به مقدار ۸/۲۷ ژول برای ضربات پیرو بعد از دو ضربه، پدیده سوراخ شدن اتفاق می‌افتد. با کاهش انرژی ضربات پیرو، تعداد ضربات لازم برای سوراخ شدن نمونه‌ها افزایش می‌یابد. بطوری‌که با انرژی ۲/۴۸ ژول برای ضربات پیرو، پدیده سوراخ شدن پس از بیست ضربه روی نمونه اتفاق می‌افتد.



شکل ۴- نمودار ضربات پیرو در برابر تعداد ضربه برای ضربه‌های اول با انرژی‌های مختلف برای ایجاد پدیده سوراخ شدن

نیرو-زمان برای ضربه‌های ششم تا ضربه یازدهم نشان داده شده است. پاسخ صفحه برای ضربه ششم تا ضربه یازدهم مشابه است و بیشتر منحنی‌ها بر هم منطبق هستند؛ ولی در ضربه دهم نیروی تماسی ماکزیمم نسبت به ضربات قبلی ۰.۷٪ کاهش یافته است.

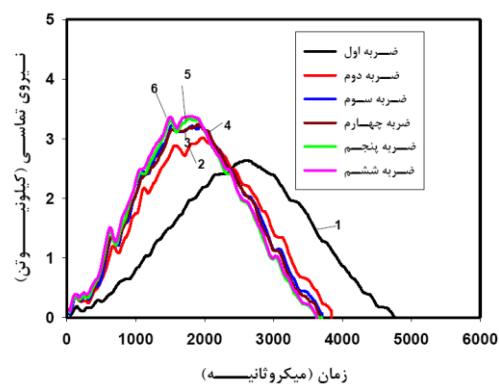


شکل ۷- تاریخچه نیرو- زمان برای ضربه‌های ششم تا یازدهم

پاسخ صفحه تحت ضربه‌های یازدهم تا شانزدهم در شکل ۸ نشان داده شده است. از ضربه یازدهم به بعد، نیروی تماسی ماکزیمم کاهش می‌یابد؛ بطوری‌که از ضربه یازدهم تا ضربه سیزدهم، افت نیروی تماسی کم است. در ضربه چهاردهم بر پشت صفحه نمونه ترک دیده شده، در ضربه پانزدهم فرورفتن و در ضربه شانزدهم سوراخ شدن اتفاق افتاده است. در ضربه چهاردهم، نیروی تماسی ماکزیمم نسبت به ضربه سیزدهم کاهش یافته، زمان تماس افزایش می‌یابد. در ضربه شانزدهم و شانزدهم آسیب افزایش یافته، بطوری‌که در ضربه شانزدهم، کمترین نیروی تماسی ماکزیمم و بیشترین زمان تماس را دارا است. تاریخچه نیرو-جابجایی ضربه‌های اول، دوم، ششم، چهاردهم و شانزدهم برای گلاره ۵ تحت ضربه اول با انرژی ۷/۰۱ ژول و ضربات پیرو با انرژی ۶ ژول در شکل ۹ نشان داده شده است.

در راستای مستقیم و جانبی در پشت صفحه ضربه خورده گسترش یافته و سوراخ ایجاد، ولی پاسخ نیرو- زمان ضربه دوم و سوم تقریباً بر هم منطبق می‌باشند.

هنگامی که نمونه گلاره ۵ تحت انرژی ضربه اول ۷/۰۱ ژول قرار می‌گیرد، روی نمونه گودی قابل مشاهده بوده، در نمای اسکن C- آسیب دیده می‌شود، بطوری‌که حالت BVID رخ می‌دهد (حالت ب شکل ۳). پس از ضربه اول، مقدار انرژی ضربه به ۶ ژول کاهش یافته و تا آخرین ضربه مقدار انرژی ثابت باقی می‌ماند. پس از ۱۶ ضربه روی ورق، یعنی یک ضربه با انرژی ۷/۰۱ ژول و ۱۵ ضربه بعدی با انرژی ۶ ژول در نمونه سوراخ شدن اتفاق می‌افتد. در شکل‌های ۶، ۷ و ۸، تاریخچه نیرو-زمان برای این ضربه‌ها نشان داده شده است. شکل ۶، تاریخچه نیرو- زمان برای ضربه اول تا ششم را نشان می‌دهد. در ضربه اول روی نمونه گودی ایجاد شده، تغییر شکل پلاستیک دیده می‌شود. در تاریخچه نیرو- زمان بخاطر وجود اثر پلاستیسیته، مدت زمان شروع تماس تا نیروی تماسی ماکزیمم (۲۶۰۰ میکرو ثانیه) از مدت زمان نیروی تماسی ماکزیمم تا جدایش ضربه‌زننده (۲۲۱۸ میکروثانیه) از ورق بزرگتر است.



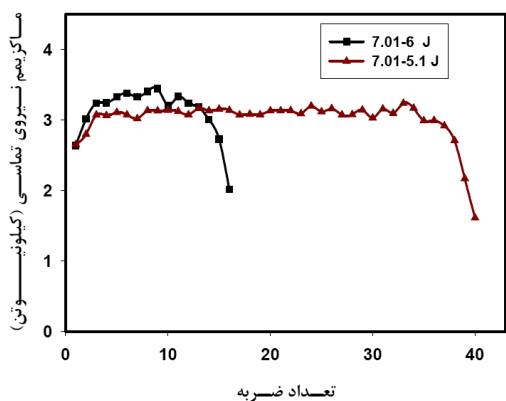
شکل ۶- تاریخچه نیرو- زمان برای ضربه‌های اول تا ششم

در ضربه دوم با وجود کاهش مقدار انرژی ضربه نسبت به ضربه اول، نیروی تماسی ماکزیمم افزایش یافته، زمان تماس کاهش می‌یابد. این افزایش نیروی تماسی به خاطر افزایش سفتی، تغییر شکل پلاستیک و هندسه ورق بخاطر ضربه اول است. از ضربه سوم تا ضربه ششم، نیروی تماسی ماکزیمم افزایش و زمان تماس کاهش می‌یابد. در شکل ۷، تاریخچه

کاهش و مساحت زیر منحنی افزایش می‌یابد که بیانگر انرژی جذب شده است.

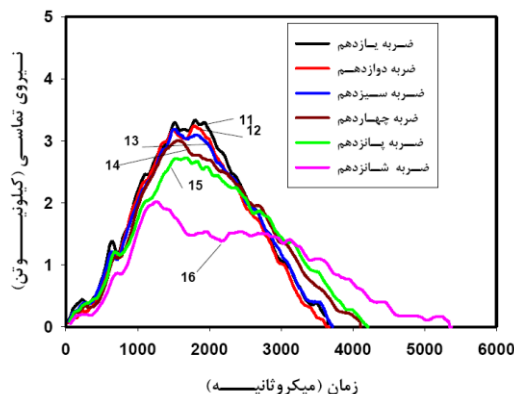
۲-۴- نیروی تماسی ماکزیمم و انرژی جذب شده برای ضربه‌های پیرو

برای بررسی ماکزیمم نیروی تماسی و نسبت انرژی جذب شده به انرژی ضربه با انرژی‌های مختلف دو حالت در نظر گرفته می‌شود. ضربه اول برای هر حالت یکسان است بطوری که پس از ضربه اول با انرژی ۷/۰۱ ژول در نمونه BVID اتفاق می‌افتد. در حالت اول، ضربه دوم با انرژی ۶ ژول انجام گرفته و تا ضربه آخر این انرژی ثابت باقی می‌ماند که پس از ۱۶ ضربه سوراخ شدن اتفاق می‌افتد. در حالت دوم، ضربه دوم با انرژی ۵/۱ ژول انجام گرفته، تا ضربه آخر این انرژی ثابت باقی می‌ماند که پس از ۴۰ ضربه سوراخ شدن اتفاق می‌افتد. شکل ۱۰، نیروی تماسی ماکزیمم در برابر تعداد ضربه را برای این دو حالت نشان می‌دهد. نیروی تماسی ماکزیمم در ضربه اول برای هر کدام ۲/۷ کیلو نیوتن است با اعمال ضربات بعدی، نیروی تماسی ماکزیمم افزایش می‌یابد که تا ضربه سوم، افزایش نیروی تماسی نسبت به ضربه قبلی اختلاف چشمگیری دارد.



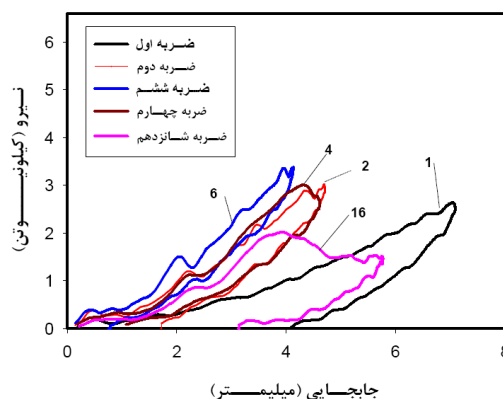
شکل ۱۰- نیروی تماسی ماکزیمم برای ضربات پیرو مختلف با انرژی ضربه اول ۷/۰۱ ژول

در حالت اول، از ضربه دوم تا ضربه نهم، افزایش در نیروی تماسی ماکزیمم بخاطر اثر کرنش سختی فلز آلومینیم دیده می‌شود از ضربه دوازدهم در آلومینیم ترک ایجاد می‌شود و بخاطر پیشروی آسیب نیروی تماسی شروع به کاهش نموده، در ضربه شانزدهم به کمترین مقدار خود می‌رسد. در حالت



شکل ۸- تاریخچه نیرو- زمان برای ضربه‌های یازدهم تا شانزدهم

جابجایی ماکزیمم و دائمی ضربه اول از بقیه ضربات بیشتر است. در ضربه دوم نسبت به ضربه اول، شیب منحنی نیرو- جابجایی افزایش یافته، جابجایی دائمی آن نیز کاهش می‌یابد. در ضربه ششم، شیب منحنی به بیشترین مقدار می‌رسد که بیانگر افزایش سفتی ورق در این ضربه است و دلیل این افزایش سفتی، بخاطر اثر کرنش سختی آلومینیم است. مساحت زیر منحنی نیرو- جابجایی ضربه ششم و دوم از ضربه اول کمتر است. در ضربه چهاردهم که ترک در پشت نمونه ایجاد شده، باعث کاهش سفتی و استحکام ماده می‌گردد و در منحنی نیرو- جابجایی شیب بارگذاری نسبت به ضربه ششم ۶٪ کاهش یافته است.



شکل ۹- نمودار نیرو-جابجایی برای ضربه‌های مختلف

سرانجام در ضربه شانزدهم در نمونه سوراخ شدن اتفاق می‌افتد و در منحنی نیرو- جابجایی، نیروی تماسی ماکزیمم

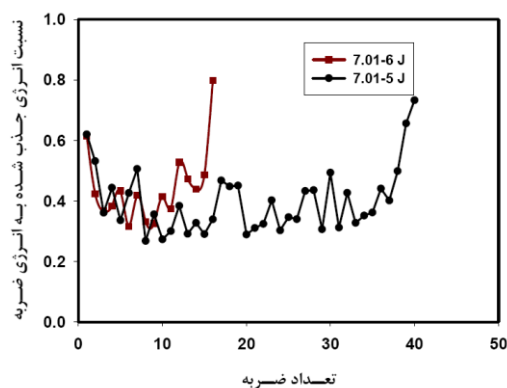
در حالات مذکور، با اعمال ضربه اول روی نمونه گودی ایجاد شده، تغییر شکل پلاستیک دیده می‌شود. از ضربه دوم سفتی ورق افزایش می‌یابد؛ بطوری‌که این افزایش سفتی به اثر کرنش سختی برمی‌گردد که باعث می‌شود انرژی جذب شده کاهش و نیروی تماسی ماکزیمم افزایش یابد؛ اگر چه با افزایش تعداد ضربه، آسیب کامپوزیت شامل، ترک در ماتریس، شکست الیاف و تورق بین کامپوزیت [0/90] و تورق میان کامپوزیت و آلومینیم افزایش می‌یابد [۲۰-۱۹]؛ اما تا قبل از ایجاد ترک در آلومینیم، هیچ افت سفتی و استحکام مشاهده نمی‌شود. پس از ایجاد ترک در آلومینیم و گسترش آن سفتی و استحکام سازه کاهش می‌یابد که سبب افزایش انرژی جذب شده، کاهش نیروی تماسی ماکزیمم می‌شود. در ضربه آخر که سوراخ شدن اتفاق می‌افتد، بیشترین انرژی جذب شده، کمترین نیروی تماسی ماکزیمم دیده می‌شود.

۵- بررسی آسیب

پس از اتمام بارگذاری ضربه روی نمونه‌ها، تعدادی از نمونه‌ها انتخاب و اسکن C- روی آنها انجام می‌گیرد. با استفاده از اسکن C، علاوه بر ناحیه آسیب می‌توان مقدار آسیب را مشخص کرد. از نرم‌افزار ALIS که در دانشگاه پلی‌تکنیک دلفت نوشته شده، می‌توان طول و عرض ناحیه آسیب دیده، همچنین مساحت آن را مشخص کرد. با وارد نمودن نتایج اسکن C به این نرم‌افزار، به کمک ابزارهایی که در نرم‌افزار تعبیه شده به راحتی طول، عرض و مساحت ناحیه آسیب خورده محاسبه می‌شود.

پس از اعمال ضربه بر صفحه گلار ۵، روی نمونه گودی یا ترک و یا سوراخ دیده می‌شود، بطوری‌که در جلوی صفحه ضربه خورده گودی بارزی مشاهده و در پشت صفحه ضربه خورده برآمدگی ایجاد می‌شود که طول و عرض آن بصورت چشمی قابل اندازه‌گیری است. در جدول ۲ قطر گودی ایجاد شده جلوی صفحه ضربه خورده، طول و عرض برآمدگی پشت صفحه ضربه خورده و طول و عرض و مساحت ناحیه آسیب بدست آمده از نتایج اسکن C برای نمونه‌های مختلف ارائه شده است. قطر گودی برای حالت DW40 که نمونه فقط تحت ضربه اول با انرژی ۳/۹۶ ژول بوده، کمترین است و برای نمونه DW11، بیشترین است. اگر طول و عرض نمای پشت صفحه ضربه خورده که بصورت چشمی و با کولیس

دوم، روند مشابهی همانند حالت قبل دیده می‌شود؛ بطوری‌که از ضربه دوم تا ضربه سوم، نیروی تماسی ماکزیمم افزایش شدیدی داشته، از ضربه سوم تا ضربه سی و دوم تقریباً ثابت باقی مانده و در ضربه سی و سوم، به حداکثر مقدارش می‌رسد که از ضربه دوم تا سی و سوم، اثر کرنش سختی ملاحظه می‌شود. از ضربه سی و چهارم تا ضربه چهلم، به دلیل ایجاد رشد ترک کاهش در نیروی تماسی ماکزیمم دیده می‌شود.



شکل ۱۱- نسبت انرژی جذب شده به انرژی ضربه برای ضربات پیرو ۶ و ۵ ژول با انرژی ضربه اول ۷/۰۱ ژول

در شکل ۱۱ نسبت انرژی جذب شده به انرژی ضربه برای حالت‌های اشاره شده در بالا نشان داده شده است. نسبت انرژی جذب شده به انرژی ضربه در هر دو حالت برای ضربه اول، حدود ۶۰ درصد است که این نشان دهنده جذب انرژی بالای گلار ۵ است. از ضربه دوم نسبت انرژی جذب شده کاهش می‌یابد، بطوری‌که در ضربه‌های ششم و هشتم بترتیب برای انرژی ضربات پیرو ۶ و ۵ ژول بخاطر افزایش سفتی به کمترین مقدار خود می‌رسد. نسبت انرژی جذب شده به انرژی ضربه از ضربه‌ای که کمترین مقدار را داراست تا ضربه-ای که ترک در فلز آلومینیم برای هر حالت رخ داده به طور نوسانی کم و زیاد می‌شود و از ضربه‌ای که ترک در فلز آلومینیم رخ داده این نسبت افزایش می‌یابد؛ بطوری‌که در هر حالت برای ضربه آخر که سوراخ شدن اتفاق افتاده، به بیشترین مقدار خود می‌رسند، در ضربه آخر سهم جذب انرژی بخاطر رشد ترک در فلز آلومینیم بالاست. بطوری‌که مقدار انرژی جذب شده در ضربه آخر نسبت به ضربه قبلی برای حالت اول و دوم بترتیب، ۴۰٪ و ۲۲٪ افزایش یافته است.

بازبینی چشمی برای نمونه تحت ضربات تکراری کمترین و بیشترین اختلاف ۰/۵ و ۳/۴ درصد است که تطابق خوبی را نشان می‌دهد.

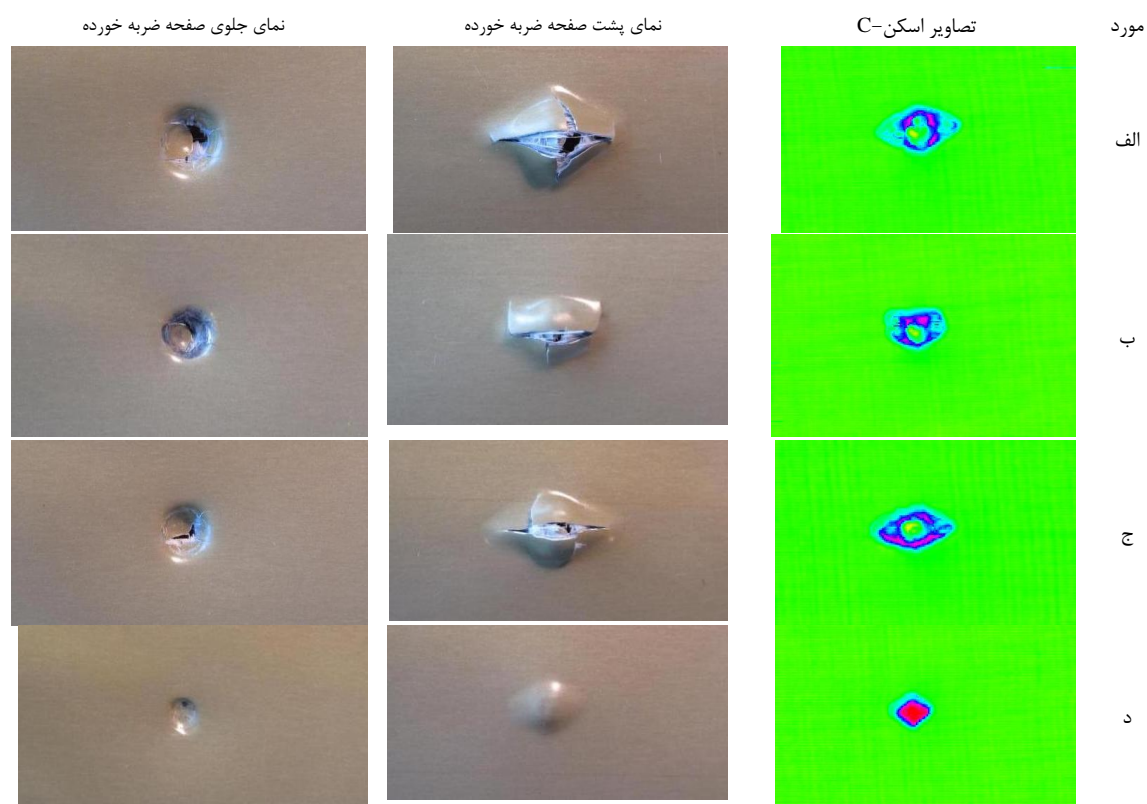
نمای جلوی صفحه ضربه‌خورده، پشت صفحه ضربه‌خورده و نتایج اسکن-C برای نمونه‌های DW11، DW16، DW27 و DW29 در شکل ۱۲ نشان داده شده است. تصاویر "الف" بعد از دو ضربه پیرو، "ب" بعد از صد ضربه پیرو، "ج" بعد از پانزده ضربه پیرو و "د" بعد از صد ضربه پیرو است. انرژی ضربه اول برای موارد "الف" و "ب" برابر ۱۷/۵۹ ژول بوده که سبب CVID در نمونه می‌شود. در مورد "الف" فقط دو ضربه روی نمونه اعمال شده است، بطوری‌که انرژی ضربه دوم در این حالت ۱۱/۷۴ ژول است. بعد از این ضربه در نمونه، سوراخ شدن اتفاق می‌افتد. در حالیکه انرژی ضربات پیرو در مورد "ب" برابر با ۱/۳۴ ژول است. "الف" و "ب" بترتیب، نمونه‌های DW11 و DW16 می‌باشند.

پس از صد ضربه با انرژی ضربه ۱/۳۴ ژول بر نمونه، همان فرورفتن رخ می‌دهد. ترک‌ها در جلوی صفحه ضربه خورده و پشت صفحه ضربه خورده برای موارد "الف" و "ب" دیده می‌شود. با توجه به نتایج اسکن-C، واماندگی الیاف و ترک ماتریس در "الف" بیشتر از "ب" است. سوراخ شدن بطور واضح در موارد "الف" و "ب" دیده می‌شود.

اندازه گرفته شده با نتایج اسکن-C توسط نرم‌افزار ALIS مقایسه شود، مشخص می‌گردد که در اکثر موارد طول و عرض محاسبه شده توسط نرم‌افزار از طول و عرض اندازه گرفته شده با کولیس بزرگتر است و اختلاف جزئی بین این دو نتیجه، بیان کننده محلی بودن آسیب در گلاره ۵ تحت ضربه است و با تکرار ضربات تا حدود ۱۰۰ ضربه نیز آسیب به صورت محلی باقی می‌ماند و در ناحیه کوچکی اطراف محل ضربه است. مقدار آسیب بزرگتر در نتایج اسکن-C، بخاطر دقیق‌تر بودن آن و استفاده از تجهیزات پیشرفته است؛ ولی در بازرسی چشمی فقط به ناحیه تغییر شکل یافته توجه می‌شود؛ اما اختلاف این دو روش جزئی است؛ بنابراین هنگامی که اسکن-C به آسانی قابل استفاده نباشد، با بررسی نمونه به صورت چشمی می‌توان مقدار آسیب را به صورت تقریبی شناسایی کرد. همچنین مساحت ناحیه آسیب‌دیده توسط اسکن-C نشان می‌دهد که بیشترین مساحت ناحیه آسیب مربوط به DW15 است. از تقسیم مساحت ناحیه آسیب محاسبه شده توسط نرم‌افزار به مساحت کلی نمونه، می‌توان درصد ناحیه آسیب را بدست آورد. در DW15، ناحیه آسیب ۰/۴ کل نمونه محاسبه می‌شود و کمترین مقدار آسیب مربوط به DW3 بوده که ۰/۰۹۸٪ مساحت کل نمونه است که مقدار بسیار جزئی است. همچنین با مقایسه نتایج اسکن-C و

جدول ۲- نتایج آسیب بازبینی چشمی و تصاویر اسکن-C

کد نمونه	جلوی صفحه ضربه خورده		پشت صفحه ضربه خورده		نتایج اسکن-C با استفاده از نرم‌افزار ALIS	
	قطر (میلیمتر)	طول (میلیمتر)	عرض (میلیمتر)	طول (میلیمتر)	عرض (میلیمتر)	مساحت (میلیمتر مربع)
DW10	۹/۳۶	۲۲/۰۲	۱۴/۲۴	۲۳/۰۲	۱۷/۰۱	۲۴۶/۷۵
DW20	۴/۱۷	۸/۶۷	۶/۵۱	۱۰/۰۰	۸/۰۲	۳۲/۲۵
DW30	۳/۶۷	۴/۹۶	۴/۴۶	۶/۵	۷/۵	۹/۰۰
DW40	۳/۰۴	۴/۶۲	۴/۱۵	۵/۵	۸/۵	۹/۲۵
DW11	۱۳/۳۷	۳۱/۲۴	۲۱/۱۴	۳۲/۰۰	۱۹/۰۳	۳۵۶/۷۵
DW12	۱۰/۹۵	۳۰/۲۰	۱۷/۷۵	۳۱/۰۲	۱۷/۵۳	۳۴۱/۲۵
DW13	۱۱/۵۴	۲۱/۲۸	۱۸/۴۳	۲۱/۵۱	۱۹/۱	۲۶۸/۵
DW14	۱۳/۱۷	۲۷/۸۹	۲۱/۵۹	۲۸/۰۴	۲۱/۵۵	۳۳۱/۲۵
DW15	۱۲/۴۲	۳۱/۲۵	۱۹/۵۳	۳۲/۰۴	۲۰/۰۶	۳۷۶/۷۵
DW16	۱۰/۱۳	۲۳/۳۰	۱۵/۳۶	۲۲/۵۱	۱۶/۵۳	۲۸۷/۰۰
DW27	۱۰/۵۹	۲۹/۹۳	۱۶/۳۷	۳۰/۰۴	۱۶/۵۳	۳۱۵/۷۵
DW28	۱۱/۳۲	۲۰/۹۷	۱۸/۳۲	۲۰/۵۲	۱۸/۰۳	۲۲۸/۲۵
DW29	۶/۴۲	۱۷/۰۷	۱۲/۱۱	۱۷/۰۰	۱۳/۵۱	۱۶۱/۰۱



شکل ۱۲- نمای جلوی صفحه ضربه خورده و پشت صفحه ضربه خورده و نتایج تصاویر اسکن-C برای نمونه‌های DW11، DW16، DW27 و DW29

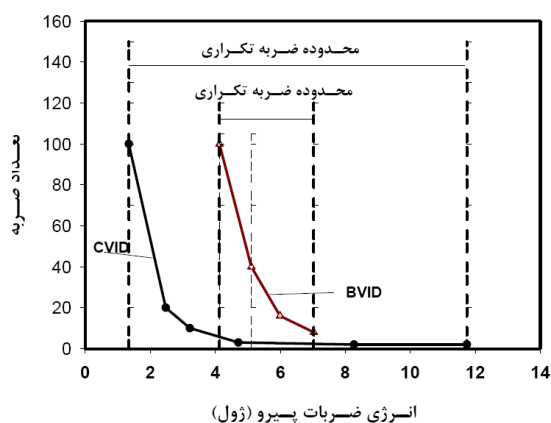
۶- بحث بر روی نتایج

با اعمال ضربه اول روی گلار ۵ با توجه به انرژی ضربه، سه حالت CVID، BVID، NVID اتفاق می‌افتد. پس از ضربه اول، مقدار انرژی ضربه برای ضربات پیرو مهم است و سازه با توجه به مقدار انرژی ضربات پیرو رفتار متفاوت از خود نشان می‌دهد.

همانطور که قبلاً بیان شد، در ضربه اول با انرژی ضربه ۱۷/۵۹ ژول روی گلار ۵ فرورفتن اتفاق می‌افتد و باعث CVID روی نمونه می‌شود. این انرژی ضربه اول برای همه نمونه‌ها یکسان است و انرژی ضربات پیرو برای نمونه‌های در نظر گرفته شده، به تدریج کاهش می‌یابد. زمانی که انرژی ضربه دوم به ۱/۳۴ ژول می‌رسد، پس از صد ضربه روی نمونه هیچ تغییری مشاهده نمی‌شود و ضربات پیرو، هیچ

با مقایسه نتایج اسکن-C برای این دو مورد مشخص می‌شود که ناحیه آسیب در "الف" بزرگتر از "ب" است. جدول ۲ این نتایج را بترتیب، ۳۵۶/۷۵ و ۲۸۷ میلی‌متر مربع نشان می‌دهد. ضربه اول برای موارد "ج" و "د" با انرژی ضربه ۷/۰۱ ژول انجام می‌شود. بطوری که این ضربه سبب BVID روی نمونه می‌شود. انرژی ضربه پیرو در مورد "ج"، همان نمونه DW27، ژول است. سوراخ شدن بعد از شانزده ضربه روی نمونه اتفاق می‌افتد. ترک‌ها در جهات مختلف در پشت صفحه ضربه خورده نمایان است. صد ضربه در "د" با انرژی ضربه ۳/۹۶ ژول انجام می‌شود که همان نمونه DW29 است. گودی روی نمونه نمایان است و هیچ ترکی در جلوی صفحه ضربه خورده و پشت صفحه ضربه خورده مشاهده نمی‌شود.

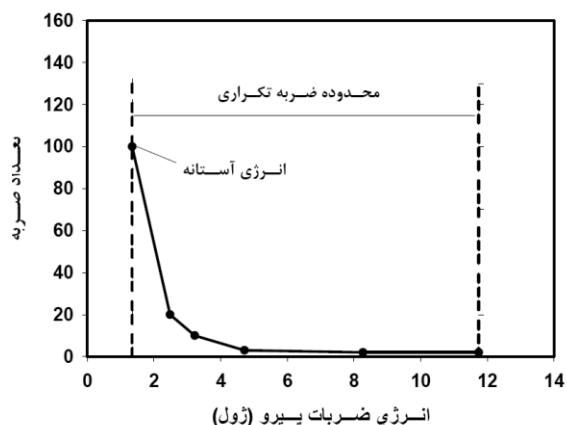
برای محدوده انرژی ضربه بین انرژی ضربه اول و حد آستانه انرژی، ضربات پیرو مهم است که می‌توان به عنوان منطقه ضربات تکراری یاد کرد؛ یعنی منطقه‌ای که ضربات پیرو نقش بسزایی دارند. در منطقه ضربه با انرژی کمتر از حد آستانه انرژی، ضربات پیرو توانایی سوراخ کردن نمونه را ندارند؛ درحالی‌که اگر انرژی ضربه در منطقه ضربه تکراری باشد، سبب سوراخ شدن صفحه بعد از تعداد مشخص ضربات تکراری می‌شود؛ بنابراین اثر ضربات تکراری برای مقادیر انرژی ضربات تکراری، بیشتر از مقدار حد آستانه انرژی مهم است؛ چون سبب آسیب بیشتر در نمونه می‌شود. به عبارت دیگر، برای مقادیر انرژی ضربه پیرو پایین‌تر از حد آستانه انرژی، اثر ضربه اول در پاسخ سازه مهم بوده، ضربات پیرو اثر قابل ملاحظه‌ای روی مقاومت نمونه ندارند.



شکل ۱۴- تعداد ضربه در برابر انرژی ضربات پیرو برای حالت BVID و CVID

شکل ۱۴ این مفهوم را علاوه بر CVID برای BVID نشان می‌دهد. با اعمال ضربه اول با انرژی ۷/۰۱ ژول روی نمونه BVID رخ می‌دهد. هنگامی که ضربات پیرو با انرژی ۳/۹۶ ژول روی نمونه اصابت می‌کند؛ پس از ۱۰۰ ضربه، اثری از سوراخ شدن روی نمونه دیده نمی‌شود و تنها عمق گودی افزایش می‌یابد؛ بنابراین انرژی ۳/۹۶ ژول، به عنوان حد آستانه انرژی برای حالت BVID در نظر گرفته می‌شود. با مقایسه موارد CVID و BVID، مشاهده می‌شود که برای ضربات تکراری، محدوده وسیعی از انرژی‌های ضربه قبل از رسیدن به انرژی آستانه متعلق به CVID بوده، ناحیه متعلق

اثری روی نمونه ندارد. منحنی شکل ۱۳ تعداد ضربه در برابر انرژی ضربات پیرو برای حالتی که ضربه اول سبب CVID شده را نشان می‌دهد. در ضربات پیرو با انرژی ۱۱/۷۴ تا ۲/۴۸ ژول بترتیب، پس از ۲ و ۲۰ ضربه در نمونه سوراخ شدن اتفاق می‌افتد؛ در حالی که برای انرژی ضربه پیرو ۱/۳۴ ژول بعد از صد ضربه روی نمونه سوراخ شدن اتفاق نمی‌افتد. همانطور که در شکل ۱۳ مشخص است، با کاهش انرژی ضربات پیرو، افزایش شدیدی در تعداد ضربه ملاحظه می‌شود و نمودار حالت مجانبی به خود گرفته است. از آنجایی که احتمال اینکه تعداد ضربه، بیش از صد ضربه در یک محل مشخص اصابت شود، کم می‌باشد. می‌توان تعداد صد ضربه را به عنوان تعداد ضربه بینهایت در نظر گرفت و انرژی ضربه ۱/۳۴ ژول را به عنوان حد آستانه انرژی ضربه در این حالت در نظر گرفت؛ بنابراین ضربات پیرو با انرژی بالاتر از ۱/۳۴ ژول مهم بوده، باید مورد بررسی قرار گیرند و انرژی ضربات پیرو کمتر از ۱/۳۴ ژول مهم نبوده، از اثرات آن می‌توان صرف‌نظر کرد.



شکل ۱۳- تعداد ضربه در برابر انرژی ضربات پیرو برای حالت CVID برای انرژی ضربه اول ۱۷/۵۹ ژول

با توجه به محدودیت آزمایش‌ها و عدم امکان بررسی تمامی انرژی ضربات پیرو بین ۲/۴۸ تا ۱۱/۳۴ ژول، مقدار انرژی ضربه ۱/۳۴ حد تقریبی آستانه انرژی ضربه است؛ در نتیجه برای صفحات FML، مقدار حد آستانه انرژی ضربه وجود دارد که در ضربه‌های تکراری برای انرژی ضربه کمتر از مقدار حد آستانه انرژی ضربه نیازی به بررسی آسیب در اثر ضربه نمی‌باشد؛ زیرا انرژی برای سوراخ شدن صفحه کافی نمی‌باشد.

- Quantitative Predictions of the Crack Growth Rates. Ph.D. Thesis. Delft University of Technology.
- [5] Tsartsaris N, Meo M, Dolce F, Polimeno U, Guida M, Marulo F (2011) Low-velocity impact behavior of fiber metal laminates. *J Compo Materials* 45(7): 803-814.
- [6] Vlot A, Vogelesang LB, De Vries TJ (1999) Towards application of fibre metal laminates in large aircraft. *Aircraft Eng Aero Technology* 71(6): 558-570.
- [7] Alderliesten R, Rans C (2009) The meaning of threshold fatigue in fibre metal laminates. *Int J Fatigue* 31: 213-222.
- [8] Abdullah MR, Cantwell WJ (2006) The impact resistance of polypropylene-based fibre-metal laminates. *Compo Sci Technology* 66: 1682-1693.
- [9] Vlot A (1991) Low-velocity impact loading on fibre reinforced aluminium laminates (ARALL) and other aircraft sheet materials. Dissertation, Delft University of Technology, The Netherlands.
- [10] Vlot A (1996) Impact loading on fiber metal laminates. *Int J Imp Engineering* 18(3): 291-307.
- [11] Vlot A, Kroon E, Rocca GL (1998) Impact response of fiber metal laminates. *Key Eng Material* 141: 235-76.
- [12] Fahr A, Chapman CE, Forsyth DS, Poon C, Laliberté JF (2000) Non-destructive evaluation methods for damage assessment in fiber-metal laminates. *Poly Composite* 21: 568-575.
- [13] Laliberté JF, Poon C, Straznicki PV, Fahr A (2000) Applications of fiber-metal laminates. *Poly Composites* 21(4):558-567.
- [14] Liu Y, Liaw B (2010) Effect of constituents and lay-up configuration on drop-weight tests of fiber metal laminates. *Appl Compo Materials* 17(1): 43-62.
- [15] Seyed Yaghoubi A, liu Y, Liaw B (2012) low Velocity Impact on Glare 5 Fiber Metal Laminate: influence of specimen Thickness and Impactor Mass. *J Aero Engineering* 25(3): 409-420.
- [16] Vlot A, Krull M (1997) Impact damage resistance of various fibre metal laminates. *J Physics* 7(3): 1045-1050.
- [17] Rajkumar GR, Krishna M, Narasimha Murthy HN, Sharma SC, Vishnu Mahesh KR (2012) Experimental investigation of low velocity Repeated impacts on Glass Fiber metal composites. *JMEPEG* 21(7): 1485-1490.
- [18] Rajkumar GR, Krishna M, Narasimha Murthy HN, Sharma SC, Vishnu Mahesh KR (2012) Investigation of Repeated low velocity impact behavior of GFRP/Aluminium and CFRP / Aluminium Laminates. *Int J Sof Compu Engineering* 1(6): 50-58.
- به BVID کوچکتر است. به بیان دیگر، ضربات تکراری نقش مهمی در حالت‌های BVID و CVID دارند و وقوع پدیده سوراخ‌شدن، وابستگی شدید به انرژی ضربات پیرو دارد.
- ### ۷- نتیجه گیری
- ضربه کم سرعت تکراری روی گلار ۵ با استفاده از دستگاه وزنه افتان بصورت تجربی، مورد بررسی قرار گرفت. پس از اصابت ضربه اول بر روی صفحه، انرژی ضربه کاهش یافته، از ضربه دوم تا ضربه آخر مقدار انرژی ضربه ثابت در نظر گرفته شد. با اعمال ضربه اول روی صفحه، سه حالت BVID، CVID و رخ داد. تعداد ضربه تا وقوع پدیده سوراخ-شدن با کاهش انرژی ضربات پیرو افزایش یافت. حد آستانه انرژی به عنوان ماکزیمم انرژی ضربه در ضربات تکراری پس از ضربه اول تعریف شد که سبب هیچ آسیبی در نمونه نگردد. برای انرژی ضربات پیرو بیشتر از حد آستانه انرژی، اثر ضربات تکراری مهم بوده، برای مقادیر کمتر از حد آستانه انرژی، ضربات تکراری نقش بارزی در ایجاد آسیب نداشتند. همچنین با مقایسه نتایج آسیب با استفاده از بازبینی چشمی و تصاویر اسکن-C کمترین و بیشترین اختلاف بترتیب، ۵/۰ و ۴/۳ درصد بدست آمد که بیانگر اختلاف جزئی بین نتایج آسیب بازبینی چشمی با اسکن-C است و این بیان کننده موضعی بودن آسیب در گلار ۵ تحت ضربه است، بطوری که آسیب در ضربه اول و ضربات پیرو در ناحیه کوچکی اطراف محل ضربه باقی می‌ماند. هنگامی که اسکن-C به آسانی قابل استفاده نباشد، با بازبینی چشمی نمونه می‌توان مقدار آسیب را با تقریب خوبی شناسایی کرد.
- ### مراجع
- [1] Vlot A, Gunnink JW (2001) *Fiber Metal Laminates: an Introduction*. Boston, Kluwer Academic Publishers, The Netherlands.
- [2] Vermeeren CAJR (2003) An historic overview of the development of fibre metal laminates. *Appl Compo Material* 10: 189-205.
- [3] Vermeeren CAJR, Beumler Th, De Kanter JLCG, Van Der Jagt OC, Out BCL (2003) Glare design aspects and philosophies. *Appl Compo Materials* 10: 257-276.
- [4] Marissen R (1984) *Fatigue Crack Growth in ARALL, A Hybrid Aluminium-Aramid Composite Material: Crack Growth Mechanisms and*

investigation on distance effects in repeated low velocity impact on Fiber-Metal Laminates. *Compo Structure* 99: 31-40.

- [19] Moriniere FD, Alderliesten RC, Yarmohammad Tooski M, Benedictus R (2012) Damage Evolution in GLARE-Fiber-Metal Laminate under Repeated Low-Velocity Impact Tests. *Cent Euro Engineering* 2(4): 603-611.
- [20] Yarmohammad Tooski M, Alderliesten RC, Ghajar R, Khalili SMR (2013) Experimental