

# بررسی استحکام باقیمانده فشاری یک ساختار گلاس/اپوکسی تحت ضربه‌های کم سرعت

محمود مهرداد شکریه

دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک - دانشگاه علم و صنعت ایران

مسعود مظفری

فارغ التحصیل کارشناس ارشد - دانشکده مهندسی مکانیک - دانشگاه علم و صنعت ایران

(تاریخ دریافت ۸۰/۲/۲۲، تاریخ تصویب ۸۰/۴/۱۵)

## چکیده

در این مقاله اثر تخریب ناشی از ضربه‌های کم سرعت بر کاهش استحکام فشاری نمونه‌هایی با سه ابعاد متفاوت بررسی شده است. با استفاده از مدل‌های تحلیلی و عددی رفتار نمونه‌ها شبیه‌سازی گردید. سپس توسط یک مطالعه آزمایشی، صحت جواب‌های مدل مورد ارزیابی قرار گرفت. نمونه‌های مذکور در ابتداء تحت ضربه‌هایی با شرایط یکسان و سپس تحت بار استاتیکی فشاری قرار گرفتند تا بتوان مقدار کاهش استحکام فشاری آنها را اندازه‌گیری کرد. نتایج آزمایشات نشان دهنده این مطلب است که در شرایط ضربه یکسان با افزایش ابعاد نمونه‌ها، سطح تخریب آنها کاهش می‌یابد و متعاقباً کاهش استحکام کمتری نیز در آنها مشاهده می‌شود. با افزایش ابعاد نمونه‌ها، حد آستانه کاهش استحکام افزایش می‌یابد. بطوریکه با افزایش ابعاد، قطعات در مقادیر بیشتری از انرژی ضربه، نشانه‌هایی از شروع کاهش استحکام فشاری را از خود نشان می‌دهند. بنابراین در شرایط واقعی که ابعاد صفحات به مراتب بزرگتر است انتظار می‌رود که کاهش استحکام کمتری داشته باشیم. روش هرگز برای اندازه‌گیری نیروی ناشی از ضربه تعمیم داده شد و سطح تخریب ناشی از ضربه نیز توسط مدل تحلیلی محاسبه گردید. سپس با استفاده از تغییر خواص مکانیکی در ناحیه تخریب شده ناشی از تخریب در مدل اجزاء محدود و با اعمال بار فشاری، استحکام باقیمانده صفحه کامپوزیتی شبیه‌سازی گردید. نتایج بدست آمده از مدلسازی توافق خوبی را با نتایج آزمایشی نشان می‌دهد.

**واژه‌های کلیدی:** سطح تخریب، استحکام باقیمانده، مواد کامپوزیت، ضربه‌های کم سرعت، روش اجزاء محدود

## مقدمه

می‌باشد [۵،۴]. اکثر تحقیقاتی که در این زمینه انجام شده است، شامل آزمایش بر روی نمونه‌ای با ابعاد خاص بوده است [۶]. در این تحقیق، اثرات ابعاد نمونه‌ها بر مقدار سطح تخریب و به طبع آن کاهش استحکام نمونه‌ها مورد مطالعه قرار گرفته است.

در این تحقیق می‌خواهیم تأثیر مقدار سطح تخریب و مودهای تخریب بر کاهش استحکام فشاری نمونه‌هایی با ابعاد مختلف را بررسی کنیم. بدین جهت نمونه‌هایی با ضخامت یکسان و سه اندازه متفاوت  $۱۰۰ \times ۱۰۰ \times ۱۵۰$ ،  $۱۵۰ \times ۱۵۰ \times ۲۰۰$  و  $۲۰۰ \times ۲۰۰ \times ۲۰۰$  میلی مترمربع که قبلاً تحت آزمایشهای ضربه قرار گرفته را تحت بارگذاری فشاری قرار می‌دهیم تا استحکام فشاری نمونه‌ها مشخص شود. تخریب باعث کاهش استحکام فشاری، کششی و برشی می‌شود ولی در میان آنها کاهش استحکام

استفاده روز افزون از مواد کامپوزیت، نشانگر مزیتها و جاذبه‌های این مواد برای صنعت می‌باشد. مواد کامپوزیت در برابر مزایایشان، مشکلاتی نیز در مقایسه با فلزات دارند. یکی از این موارد ایجاد تخریب ناشی از ضربه در کامپوزیتها می‌باشد. ایجاد تخریب در مواد کامپوزیت یکپارچگی ساختاری آنها را از بین می‌برد و باعث کاهش استحکام کلی ساختار می‌شود. در بعضی مواقع تخریبهای سطحی که با چشم دیده نمی‌شوند، می‌توانند حتی تا ۵۰ درصد استحکام فشاری را کاهش دهند [۱-۳].

در تحقیقات انجام شده، نمودارهای کاهش استحکام باقیمانده فشاری که برحسب سطح تخریب رسم شده اند، نشان دهنده اثر تخریب در کاهش شدید استحکام می‌باشند بطوریکه روند کاهش استحکام در شروع تخریب خیلی سریعتر از مراحل پیشرفته تر تخریب

نخورده، تحت بار فشاری قرار گرفتند. در نمونه ضربه نخورده، مود غالب باز شدن لایه از هم<sup>۴</sup> بود که ناشی از کمناش لایه‌ها است. همچنین مقداری تورق و ترک ماتریسی مشاهده شد ولی گستردگی آنها به مراتب کمتر از گسترش تخریب در نمونه از پیش تخریب شده بود.

### تحلیل مدل

مدل مذکور نمونه‌ای ساخته شده از گلاس/اپوکسی با ابعاد  $100 \times 100$  میلی متر مربع و ضخامت  $1/85$  میلی متر و با شرایط مرزی چهار طرف کاملاً مقید می‌باشد. ساختار مدل، به شکل  $s_{[45/0/90]_{\pm 45}}/0/90$  می‌باشد. خواص مکانیکی ماده گلاس/اپوکسی عبارتست از:

$$E_x = E_y = 16.28 \text{ (GPa)}, G_{xy} = 3.7 \text{ (GPa)}$$

$$X_t = Y_t = 221 \text{ (MPa)}, X_c = Y_c = 366 \text{ (MPa)}$$

$$\nu = 0.047 \text{ and } S_{xy} = 47 \text{ (MPa)}$$

اعمال نیروی ضربه بر روی آن نیز شبیه نمونه A100 می‌باشد که در بخش آزمایشات به تفصیل شرح داده خواهد شد. پرتابه‌ای با جرم  $1/812$  کیلوگرم از ارتفاع ۱ متر بر روی نمونه برخورد کرده است. جهت محاسبه نیروی ضربه از رابطه تعادل انرژی و تئوری ضربه هرترز که برای مواد کامپوزیت بسط یافته [۱۰]، استفاده شده است. در این تحقیق جهت محاسبه ضریب سفتی صفحه و متعاقب آن نیروی ضربه و خیز حداکثر از روش ریتز استفاده شده و برنامه‌ای کامپیوتری بدین منظور نوشته شده است و در آن فرض شده است که اولین مود طبیعی، مود غالب ارتعاشی صفحه می‌باشد. با توجه به این فرض و با استفاده از روش رایلی-ریتز، زمان اعمال ضربه نیز محاسبه شده است. در ادامه، جهت محاسبه تنش های ناشی از اعمال نیروی ضربه، روش اجزاء محدود بکار گرفته شده است. در ساختن مدل اجزاء محدود از المانهای صفحه‌ای<sup>۵</sup> چهار وجهی<sup>۶</sup> با ۹ گره استفاده شده است. دو نوع تحلیل استاتیکی و گذرا جهت محاسبه تنش استفاده شده است. در تحلیل گذرا، پرتابه به شکل جرمی نقطه‌ای در محل ضربه در نظر گرفته شده است.

در این تحلیل، بار اعمالی در حقیقت مقدار خیز در محل ضربه است که بصورت تابعی مثلثی نسبت به زمان به

فشاری به مقدار بیشتری مشاهده می‌شود. زیرا بر اثر ضربه، لایه‌ها از هم جدا می‌شوند و حال اگر نمونه تحت بار فشاری قرار بگیرد، لایه‌هایی که دچار تورق شده‌اند، تحت کمناش موضعی<sup>۱</sup> تخریب می‌شوند. علاوه بر کمناش موضعی، تورق نیز می‌تواند سبب ایجاد کمناش عمومی<sup>۲</sup> و یا ترکیبی از این دو نوع کمناش بشود. هنگامیکه سطح تورق افزایش می‌یابد، مود کمناش از موضعی به عمومی تغییر می‌یابد. بر اثر تخریب ناشی از ضربه، استحکام کششی نیز می‌تواند کاهش یابد. ولی در مواقعی که تخریب از ترک ماتریسی تجاوز نکرده است، این استحکام ثابت می‌ماند [۱]، بنابراین اغلب آزمایشهای پس ضربه<sup>۳</sup> براساس آزمایشهای فشاری استاتیکی انجام می‌شود.

جهت شبیه سازی استحکام باقیمانده، یکی از نمونه‌ها به روش اجزاء محدود مدل سازی می‌شود. در این تحلیل، در مرحله اول مقدار سطح تخریب ناشی از ضربه بوسیله مدل اجزاء محدود و اعمال نیروی معادل به آن محاسبه می‌شود. روش مذکور بر پایه تئوری ضربه هرترز است که برای ساختارهای کامپوزیت تعمیم یافته است. در مرحله دوم خواص مکانیکی ناحیه سطح تخریب نظیر مدول و استحکام کاهش داده می‌شود، سپس صفحه مذکور تحت بار فشاری قرار می‌گیرد تا مقدار باری که منجر به گسیختگی کامل قطعه می‌شود، مشخص گردد.

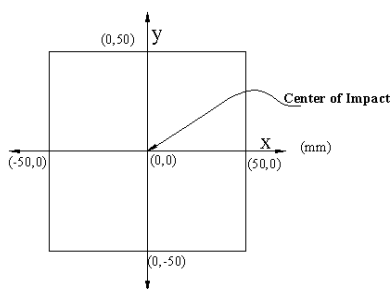
### الگوهای تخریب طی بارگذاری فشاری

هنگامی که قطعه تخریب شده توسط ضربه، تحت بار استاتیکی قرار می‌گیرد، تورق شروع به رشد می‌کند و این رشد تا جاییکه قطعه گسیخته شود، ادامه دارد. بررسی ها نشان می‌دهد که رشد تورق در بارگذاریهای فشاری بیشتر از کششی است و به همین علت استحکام باقیمانده کششی بیشتر از فشاری است [۷-۹]. همچنین مشخص شده که تورق ناشی از ضربه با تورق ناشی از بارگذاری استاتیکی متفاوت است، بطوریکه در لایه‌های  $+45$  و  $-45$  در مرحله تورق ناشی از ضربه، الیاف لایه  $-45$  از ماتریس آن جدا می‌شود [۶]، در حالیکه در تورق ناشی از بارگذاری فشاری، الیاف لایه  $+45$  از ماتریس جدا می‌شود. همچنین در تحقیق فوق [۷] جهت مقایسه تخریب ناشی از فشار استاتیکی، دو نمونه ضربه خورده و ضربه

که در این رابطه، استحکام برشی صفحه  $S_{xz} = XZ$  استحکام برشی خارج از صفحه  $S_{yz} = YZ$  و  $S_z$  استحکام در جهت  $Z - Z$  می‌باشند. در این تحلیل  $\sigma_z = 0$  فرض شده است. با در نظر گرفتن معیار فوق و بدست آوردن مقادیر تنش برشی بین صفحه‌ای در تحلیل استاتیکی، مشخص شد که حداکثر سطح تخریب تورق ۱۱۰ میلیمتر مربع می‌باشد. در حالیکه نتایج آزمایشگاهی مقدار سطح تخریب را تقریباً ۲۰۰ میلیمتر مربع نشان می‌دهد. دلیل عمده جهت وجود اختلاف بین این دو مقدار، محدودیت توانایی معیار تخریب صرفاً در یافتن شروع تخریب و نه پیشرفت و توسعه آن است.

### محاسبه استحکام باقیمانده توسط مدل

در ادامه، جهت بررسی اثرات تورق بر کاهش استحکام فشاری مدل مذکور، خواص مکانیکی در ناحیه متورق شده مدل به اندازه یک صدم مقادیر اولیه کاهش داده شد. این فرض در بعضی از تحلیلها که به رشد تخریب در مدل‌های اجزاء محدود پرداخته‌اند [۱۲، ۱۱] استفاده شده است. سپس مدل مذکور در چند مرحله تحت بارگذاری فشاری استاتیکی قرار گرفت، تا جاییکه نمونه تحت این بار دچار گسیختگی کامل شود. جهت پیش بینی تخریب از معیار تسای وو [۱۳] استفاده می‌شود. از آنجاییکه در نمونه‌های آزمایشگاهی مشاهده شده بود که تخریب بصورت افقی (عمود بر جهت بارگذاری) و از نقطه تخریب ناشی از ضربه اتفاق می‌افتد، بنابراین بررسی سطح تخریب در مدل اجزاء محدود نیز در همین ناحیه انجام گرفته است. در شکل (۲) ابعاد مدل مشخص شده است. در این شکل (0,0) نشان دهنده نقطه اعمال ضربه است.

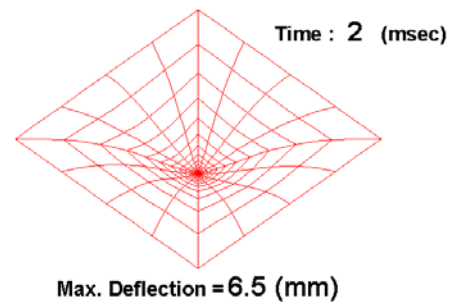


شکل ۲: ابعاد صفحه مدل سازی شده.

مرکز صفحه اعمال شده است. اعمال نیرو بر حسب زمان سبب ایجاد خیزهای بسیار بزرگی در محل ضربه می‌شود که در نتیجه آن نتایج خیز و تنشی که از این تحلیل گذرای خطی بدست می‌آید، غیر واقعی می‌باشد. در تحلیلی دیگر، قید خیز حداکثر در نقطه ضربه بصورت استاتیکی به محل ضربه اعمال شده و نتایج تنش در این دو تحلیل با یکدیگر مقایسه شد. شکل توزیع تنش در این دو تحلیل مشابه است ولی مقادیر تنش در تحلیل گذرا کمی بیشتر از تحلیل استاتیکی می‌باشد. بعنوان نمونه حداکثر مقادیر تنش  $S_{xx}$  که در سه لایه اول این دو تحلیل و در ناحیه دایره سطح ضربه خوره، به شرح زیر است:

جدول ۱: مقایسه حداکثر مقادیر تنش در دو تحلیل استاتیکی و گذرا.

شماره لایه	تحلیل گذرا (MPa)	تحلیل استاتیکی (MPa)	درصد تفاوت در نتایج گذرا و استاتیکی %
لایه اول	-390	-337	13.5
لایه دوم	-274	-241	12
لایه سوم	-166	-157	5.4



شکل ۱: نمایش حداکثر خیز صفحه مدل سازی شده.

با توجه به نتایجی که از مقایسه مقادیر تنش در این دو تحلیل بدست آمده، می‌توان از نتایج تحلیل استاتیکی به جای تحلیل گذرا استفاده کرد. معیاری که جهت محاسبه سطح تخریب تورق ناشی از ضربه استفاده شده است [۱۱]، عبارتست از:

$$\left(\frac{\sigma_z}{S_z}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{xz}}{S_{xz}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{yz}}{S_{yz}}\right)^2 = 1$$

(۱)

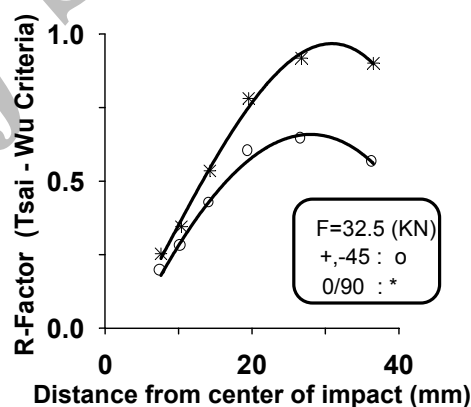
بررسی گسترش تخریب ناشی از بارگذاری فشاری، در جهت محور X انجام می‌شود. نمودار (۳) نشان دهنده گسترش تخریب بر روی پاره خطی است که از مرکز صفحه شروع شده به سمت لبه آن ادامه می‌یابد. در این نمودار نقطه (0,0) همان نقطه اعمال ضربه در شکل (۲) است که بعنوان مبدأ گسترش تخریب در نظر گرفته شده است. در نمودار (۳) محور Y، نشانگر مقادیر ضریب R (ضریب تنش در معادله پیشنهادی تسای-وو) می‌باشد. هرگاه در نقطه‌ای مقدار این ضریب کمتر از ۱ بشود، آن نقطه دچار تخریب می‌شود. در تحلیلی که انجام گردید، مقدار باری که در آن مدل دچار گسیختگی کامل می‌شود، ۳۲/۵ کیلونیوتن می‌باشد که در طی آن گسیختگی به لبه‌های نمونه شکل (۲) رسیده است. در نمونه آزمایشگاهی این مقدار ۳۶ کیلونیوتن است، بنابراین نتایج بدست آمده از تحلیل محافظه‌کارانه می‌باشد.

لذا به هر سری از نمونه‌ها ۳ عدد اضافه می‌شود. در نهایت مجموع قطعات ۴۵ نمونه می‌باشد. هر قطعه دارای کد مشخصی است؛ بعنوان مثال: A50-1، که در آن A نشان دهنده سری نمونه و 50 نشان دهنده ارتفاع سقوط پرتابه بر روی نمونه می‌باشد و عدد 1 نشانگر شماره قطعه (از 1 تا 3) می‌باشد. در دستگاه ضربه مورد استفاده جهت انجام آزمایشات، وزن پرتابه مساوی ۱/۸۱۲ کیلوگرم، حداکثر ارتفاع سقوط پرتابه معادل ۱۰۰ سانتیمتر، شعاع نوک کروی شکل پرتابه معادل ۹/۵ میلی‌متر، و ابعاد میز دستگاه مساوی ۴۰۰×۴۰۰ میلی‌متر مربع می‌باشد. شرایط مرزی صفحه نمونه بشکل چهار طرف کاملاً در گیر می‌باشد. جهت مقید کردن لبه‌های ورق، از یک صفحه به ابعاد ۲۹۰×۲۹۰ میلی‌متر مربع که همانند میز دستگاه سوراخکاری شده است، استفاده می‌شود. بدین منظور، لبه‌ها بین تکیه گاه‌های تسمه‌ای شکل و صفحه مذکور بوسیله ۸ عدد پیچ محکم نگه داشته می‌شود. شکل (۴) و (۵) نشان دهنده تخریب در نمونه‌هاست. نتایج مقادیر سطح تخریب در جدول (۲) آورده شده است.

### روند انجام آزمایشات بارگذاری فشاری

صفحاتی که تحت ضربه قرار گرفته‌اند، در این مرحله تحت آزمایش فشاری قرار می‌گیرند. به منظور

بررسی گسترش تخریب ناشی از بارگذاری فشاری، در جهت محور X انجام می‌شود. نمودار (۳) نشان دهنده گسترش تخریب بر روی پاره خطی است که از مرکز صفحه شروع شده به سمت لبه آن ادامه می‌یابد. در این نمودار نقطه (0,0) همان نقطه اعمال ضربه در شکل (۲) است که بعنوان مبدأ گسترش تخریب در نظر گرفته شده است. در نمودار (۳) محور Y، نشانگر مقادیر ضریب R (ضریب تنش در معادله پیشنهادی تسای-وو) می‌باشد. هرگاه در نقطه‌ای مقدار این ضریب کمتر از ۱ بشود، آن نقطه دچار تخریب می‌شود. در تحلیلی که انجام گردید، مقدار باری که در آن مدل دچار گسیختگی کامل می‌شود، ۳۲/۵ کیلونیوتن می‌باشد که در طی آن گسیختگی به لبه‌های نمونه شکل (۲) رسیده است. در نمونه آزمایشگاهی این مقدار ۳۶ کیلونیوتن است، بنابراین نتایج بدست آمده از تحلیل محافظه‌کارانه می‌باشد.



شکل ۳: گسترش تخریب در عرض مدل.

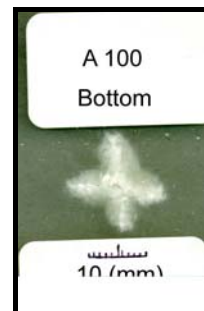
### آزمایشات

نمونه‌هایی که مقدار کاهش استحکام در آنها بررسی می‌شود در ابتداء تحت آزمایشهای ضربه قرار می‌گیرند. سپس در مرحله بعدی آزمایشهای فشاری استاتیکی بر روی آنها انجام می‌شود تا میزان کاهش استحکام بر حسب انرژی ضربه در آنها مشخص شود. این نمونه‌ها، صفحاتی مربعی شکل و به ابعاد ۱۰۰×۱۰۰، ۱۵۰×۱۵۰ و ۲۰۰×۲۰۰ میلی‌متر مربع و ضخامت متوسط ۱/۸۵ میلی‌متر می‌باشند. در ساخت نمونه‌ها از ۸ لایه یافته شده استفاده شده است. لایه چینی که در ساخت نمونه‌ها بکار رفته به شکل

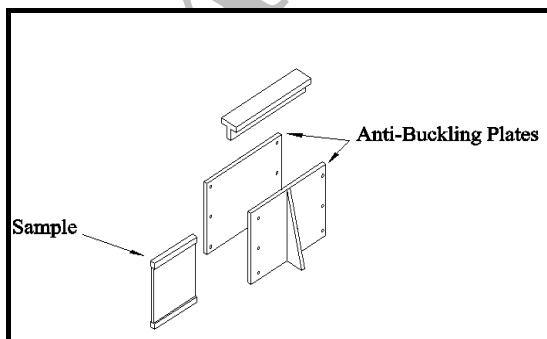
جدول ۲: نتایج سطح تخریب در نمونه‌های سری A، B و C.

نتایج سطح تخریب در نمونه‌های سری A		
ارتفاع سقوط پرتابه (cm)	انرژی ضربه (J)	متوسط سطح تخریب (mm)
25	4.44	13
50	8.88	55
75	13.32	120
100	17.75	170
نتایج سطح تخریب در نمونه‌های سری B		
ارتفاع سقوط پرتابه (cm)	انرژی ضربه (J)	متوسط سطح تخریب (mm)
25	4.44	-----
50	8.88	21
75	13.32	66.5
100	17.75	91.5
نتایج سطح تخریب در نمونه‌های سری C		
ارتفاع سقوط پرتابه (cm)	انرژی ضربه (J)	متوسط سطح تخریب (mm)
25	4.44	10
50	8.88	15.8
75	13.32	48.6
100	17.75	71.5

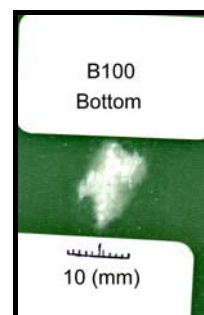
جلوگیری از کمانش عمومی صفحات در طی بارگذاری فشاری، قیدی طراحی شده است که صفحه نمونه را از دو طرف نگه می‌دارد. قید مذکور دو کفه می‌باشد و نمونه بین این دو بخش قرار می‌گیرد. این دو کفه بوسیله ۶ عدد پیچ به یکدیگر متصل می‌شوند. ابعاد کفه‌ها  $250 \times 250 \times 15$  میلی‌متر می‌باشد. سفت کردن این دو صفحه به یکدیگر باید به اندازه‌ای باشد که از کمانش موضعی لایه‌ها در نقطه تخریب شده جلوگیری نکنند. جهت عدم قید کامل کمانش‌های موضعی در نقطه تخریب شده، شیارهایی بر روی صفحات فلزی مذکور و در جهت بارگذاری، ایجاد شده است. عمق این شیارها ۲ میلی‌متر و پهنای آن ۳ میلی‌متر می‌باشد. از آنجایی که بار فشاری بر لبه نمونه وارد می‌شود، جهت جلوگیری از تخریب در لبه نمونه‌ها در دو سمت لبه آنها تب<sup>۱</sup> چسبانده می‌شود. طول تب برابر با عرض نمونه‌ها و ارتفاع آن مساوی ۱۰ میلی‌متر است. نمایی از طرز قرار گرفتن نمونه آزمایشی و تبها در شکل (۶) آورده شده است.



شکل ۴: نمایش سطح تخریب در نمونه A100.

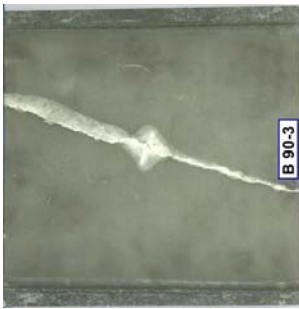


شکل ۶: نمایی از طرز قرار گرفتن نمونه و تبها در قید.



شکل ۵: نمایش سطح تخریب در نمونه B100.

### جدول ۳: نتایج کاهش استحکام فشاری در نمونه‌های سری A، B و C.



شکل ۷: گسترش تخریب یکی از نمونه‌های ضربه خورده تحت بار فشاری.

نمونه‌های سری C		نمونه‌های سری B		نمونه‌های سری A	
کد	استحکام (MPa)	کد	استحکام (MPa)	کد	استحکام (MPa)
CV	235	BV	249.5	AV	253
C25	-----	B25	-----	A25	275
C50	-----	B50	257	A50	231.5
C75	231.5	B75	200	A75	195.5
C100	227.5	B100	178.5	A100	179.6

از یک دستگاه اینسترون<sup>۱۱</sup> جهت آزمایش فشاری استفاده شده و نرخ بارگذاری فشاری نمونه‌ها ۱ میلی‌متر بر دقیقه در نظر گرفته شد. در ادامه کار، نتایج آزمایشات فشاری و توضیحاتی درمورد روش انجام آنها آورده شده است. لازم به تذکر است که جهت تعیین مقدار کاهش استحکام نمونه‌های ضربه خورده، نسبت به نمونه‌های ضربه نخورده، نمونه‌های سالم<sup>۱۲</sup> نیز تحت بارگذاری قرار گرفته‌اند که در نامگذاری آنها حرف V بکار رفته است. در جدول (۳) نتایج آزمایشات کاهش استحکام انجام شده بر روی سری A، B و C آورده شده است.

### نتایج آزمایشات تکمیلی

این آزمایشها بر روی نمونه‌هایی با ابعاد سری B و C انجام شده است. ضربه نواخته شده بر نمونه‌ها بوسیله پرتابه‌ای باجرم ۳/۲ کیلوگرم و از ارتفاع ۹۰ سانتیمتر انجام شده است که انرژی ضربه‌ای معادل با ۲۸/۲ ژول میباشد. در این سری از آزمایشها، سطح تخریب نه تنها در سطح زیرین بلکه در سطح رویین نیز به اندازه قابل توجهی زیاد است و بنابراین انتظار کاهش استحکام زیادی می‌رود. لازم بذکر است که در این نمونه‌ها ترک ماتریسی، تورق و همچنین مقداری گسیختگی الیاف در سطح وسیعی اتفاق افتاد، بطوریکه تغییر شکلی دائمی، به شکل فرورفتگی، در محل ضربه بوجود آمد. بصورت متوسط استحکام نمونه B90 به ۱۲۲/۵ (مگا پاسکال) و نمونه C90 به ۱۵۹/۶ (مگا پاسکال) کاهش یافت. شکل (۷) نشانگر تخریب ناشی از بارگذاری فشاری بر روی نمونه B90 می‌باشد.

### بحث درباره نتایج بدست آمده

در آزمایشات فشاری انجام شده بر روی نمونه‌های سری A25 مشاهده شد که این نمونه‌ها از محل تخریب ناشی از ضربه نشکستند. این موضوع نشان دهنده عدم تأثیر تخریب ناشی از ضربه بر استحکام فشاری صفحه است بدین معنی که تخریب مذکور در آستانه کاهش استحکام قرار دارد، بنابراین استحکامی که نمونه‌ها از خود نشان دادند همان استحکام کاهش نیافته است که در آزمایشهای سری AV نیز بدست آمد. نمونه‌های سری A50، A75 و A100 از محل تخریب شکستند. در نمونه‌های سری B50، نمونه‌ها از محل تخریب نشکستند بنابراین نمونه‌ها در آستانه کاهش استحکام می‌باشند، پس از پیش مشخص است که نتیجه آزمایش نمونه‌های B25 نیز همین است. نمونه‌های سری B75 و B100 از محل تخریب شکستند. در نمونه‌های سری C75، نمونه‌ها از محل تخریب نشکستند بنابراین نمونه‌ها در آستانه کاهش استحکام قرار دارند. لذا می‌توان نتیجه گرفت که آزمایش نمونه‌های C25 و C50 نیز همین روال را نشان می‌دهد. همان طور که انتظار می‌رود، آزمایشات فشاری نشان دهنده تأثیر تخریب بر کاهش استحکام می‌باشند. این روند کاهش در نمودار (۸) برای نمونه‌های سری A، B و C نمایان است.

نمودارهایی که از نقاط مربوط به استحکام باقیمانده و براساس روش حداقل مربعات عبور کرده در شکل (۸) مشخص است. علت اینکه از شکل عمومی  $Y = A + B/X$  جهت تقریب زدن منحنی‌ها استفاده شده است این نکته است که با افزایش انرژی ضربه، مود

### نتیجه گیری

در این تحقیق، اثرات ضربه‌های کم سرعت بر روی نمونه‌هایی با ابعاد مختلف و کاهش استحکام فشاری متعاقب آن مورد بررسی قرار گرفته است. دو عامل ایجاد تخریب در صفحات کامپوزیتی نیروی ضربه و خیز بیش از اندازه در محل ضربه می‌باشد. با افزایش ابعاد نمونه‌ها صلبیت صفحات کم می‌شود، بنابراین نیروی ضربه کاهش می‌یابد. ولی از طرفی مقدار خیز در محل ضربه بیشتر می‌شود. نتایجی که از سطح تخریب آزمایش‌های ضربه بدست آمده نشانگر این نکته است که نیروی ضربه اثرات مخرب‌تری نسبت به خیزهای بیش از اندازه دارد. در شرایط آزمایشی یکسان با افزایش ابعاد نمونه‌ها، سطوح تخریب کاهش می‌یابد و متعاقب آن درصد کاهش استحکام فشاری نیز کمتر می‌شود. در بخش دیگری از این تحقیق به روشی نیمه تحلیلی نیروی ضربه و زمان اعمال ضربه محاسبه گردید. سپس به روش اجزاء محدود خیز ناشی از نیروی ضربه در طی زمان ضربه به مدل اعمال شد و مقادیر تنش ناشی از آن در دو تحلیل گذرا و استاتیکی با یکدیگر مقایسه شد. نتایج این دو تحلیل مشابهت تقریبی را با یکدیگر نشان می‌داد. مقادیر سطح تخریب تورق که از این تحلیل بدست آمد کمتر از مقدار نمونه آزمایشگاهی آن بود. علت این تفاوت، در نظر نگرفتن اثر کرنش‌های بزرگ در ناحیه ضربه است. جهت بررسی اثر این تخریب بر کاهش استحکام فشاری مدل ارائه شده نیز، خواص این ناحیه تا یک صدم خواص اولیه کاهش داده شده و نمونه تحت فشار قرار گرفت. مقدار باری که در طی آن مدل مذکور دچار گسیختگی کامل می‌شد کمتر از نتایج آزمایشگاهی بود. علت این تفاوت در این است که مدل مذکور به شکل تخریب پیش رونده در نظر گرفته نشده است.

### فهرست علائم

$E_x$ : مدول الاستیسیته در جهت الیاف

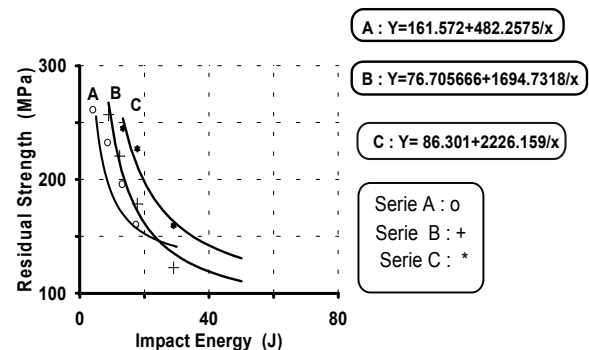
$E_y$ : مدول الاستیسیته در جهت عمود بر الیاف

$G_{xy}$ : مدول برشی صفحه

$X_t$ : استحکام کششی در جهت الیاف

$Y_t$ : استحکام کششی در جهت عمود بر الیاف

تخریب به سمت گسیختگی الیاف سوق داده می‌شود و در این مورد روند کاهش استحکام کند می‌شود. بنابراین نمودار کاهش استحکام به شکل یک منحنی با شیب خیلی کم و یا تقریباً صفر در می‌آید و رابطه مذکور چنین منحنی را تأمین می‌کند. همانطور که از قبل انتظار می‌رفت، با افزایش سطح تخریب، مقدار کاهش استحکام در این نمونه‌ها نیز افزایش می‌یابد. در سه نمودار بالا در ابتداء کاهش استحکام دیده نمی‌شود. این ناحیه همان محدوده حد آستانه تخریب نمونه‌ها می‌باشد. مثلاً حد آستانه تخریب در نمونه‌های سری C حدود ۱۷ ژول می‌باشد؛ یعنی اگر ضربه‌هایی با حداکثر انرژی ۱۷ ژول به نمونه‌هایی با مشخصات نمونه‌های سری C برخورد کند، تخریب ایجاد شده در آنها نمی‌تواند باعث کاهش استحکام شود. همین حد آستانه برای نمونه‌های سری B حدود ۹ ژول و برای نمونه‌های سری A حدود ۴/۵ ژول می‌باشد. بطوریکه از شکل (۸) مشخص است، هر سری از نمونه‌ها حد آستانه متفاوتی با سری دیگر دارد، بطوریکه با بزرگ شدن ابعاد نمونه‌ها، حد آستانه تخریب آنها نیز افزایش می‌یابد. بنابراین در حالیکه ابعاد نمونه افزایش می‌یابد، سطح تخریب کاهش می‌یابد و مود تخریبی آن نیز از تورق به مود ترک‌های ماتریسی تغییر می‌یابد بنابراین در نمونه‌های واقعی که سطوح وسیعی دارند، نسبت سطح تخریب به پهنای نمونه آنها، کمتر از نمونه‌های آزمایشی است، در نتیجه کاهش استحکام آنها کمتر و حد آستانه تخریب آنها نیز به مراتب بیشتر است. شکل تخریب ناشی از بارگذاری فشاری در همه نمونه‌ها بصورت باز شدن و درهم رفتن لایه‌ها در یکدیگر می‌باشد.



شکل ۸: کاهش استحکام فشاری در نمونه‌های سری A، B و C بعد از اعمال ضربه.

$S_{xz}$  : استحکام برشی در صفحه (Z - X)

$S_{yz}$  : استحکام برشی در صفحه (Z - Y)

$S_z$  : استحکام کششی در جهت Z

$X_c$  : استحکام فشاری در جهت الیاف

$Y_c$  : استحکام فشاری در جهت عمود برالیاف

$V$  : ضریب پواسون اصلی

$S_{xy}$  : استحکام برشی صفحه

## مراجع

- 1 - Richardson, M. O.W. and Wisheart, M. J. (1996). "Review of low velocity impact properties of composite materials." *Composites, Part A27A*, PP. 1123-1131.
- 2 - Kumar, Prashant, Kishore N.N. (1998). "Initiation and propagation of delamination crack under an impact load ." *Journal of the Mechanics & Physics of Solids*, Vol. 46 ISS, PP.1773-1807.
- 3 - Zhang B., Chen, X. and Li, P. (2001). "Discussion of compression strength after impact (CAI) of BMI /carbon fiber composites." *Journal of Advanced Materials (1070-9789)*, Vol. 33, No. 1, PP. 13-16.
- 4 - Davies, G. A. O. and Hitchings, D. (1996). "Impact damage and residual strengths of woven fabric glass/ polyester laminates." *Composites, Part A27A*, PP.1178-1202.
- 5 - Siow, Y.P. and Shim,V.P.W. (1998). "An experimental study of low velocity impact damage in woven fiber composites." *Journal of Composite Materials*, Vol. 32 ISS, PP. 517-523.
- 6 - Papanicolaou, G. C. and Stavropoulos, D. (1995). "New approach for residual compressive strength prediction of impacted CFRP laminates." *Composites*, Vol. 26, PP. 517-523.
- 7 - Shikhmanter, L., Cina, B. and Eldror, I. (1995). "Fractography of CFRP composites damaged by impact and subsequently loaded statically to failure." *Composites*, Vol. 26, PP. 154-160.
- 8 - Choi, N. S., Kinloch, A. J. and Williams, J. S. (1999). "Delamination fracture of multidirectional carbon-fiber /epoxy composite under mode I, Mode II and Mixed Mode I/II Loading." *Journal of Composite Materials*, Vol. 33 ISS.
- 9 - Kuzma, S. K. and Vizzini, Anthony, J. (1999). "Failure of sandwich to laminate, tapered composite structures." *AIAA Journal*, Vol. 37 ISS, PP. 227-231.
- 10 - Greszczuk, L. B. (1975). "Response of isotropic and composite materials to particle impact." *Foreign Object Impact Damage to Composites, ASTM STP 568, American Society for Testing and Materials*, PP.183-211.
- 11 - Shokrieh, M. M. (1996). *Progressive fatigue damage modeling of composite materials*. Ph.D. Thesis, Feb, Mechanical Engineering Department, McGill University.
- 12 - Ochoa, O. O. and Reddy, J. N. (1992). *Finite element analysis of composite laminates*. Kluwer Academic Publishers,.
- 13 - Gibson, R. F. (1994). *Principles of composite material mechanics*. McGraw-Hill.

## واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- |                     |                   |
|---------------------|-------------------|
| 1 - Local Buckling  | 7 - E-Glass/Epoxy |
| 2 - Global Buckling | 8 - Vacuum Bag    |
| 3 - Post-Impact     | 9 - Brooming      |
| 4 - Shear-Kinking   | 10 - Tab          |
| 5 - Plate           | 11 - Instron      |
| 6 - Quadrilateral   | 12 - Virgin       |