



دانشگاه تربیت مدرس

# ضربه بر روی سازه‌های کامپوزیتی

نویسنده: سرگئی ابریت

مترجم: دکتر فرامرز آشنای قاسمی

عضو هیأت علمی دانشگاه تربیت مدرس شهید رجایی

|                      |                                                                          |
|----------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| سرشناسه              | ابریت، سرچ، ۱۹۵۲-م Abrate, Serge                                         |
| عنوان و نام پدید آور | ضربه بر روی سازه های کامپوزیتی / نویسنده سرگئی ابریت: فرامرز آشنای قاسمی |
| مشخصات نشر           | تهران: دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی، ۱۳۹۲.                              |
| مشخصات ظاهری         | ۲۶۵ ص، مصور، جدول، نمودار.                                               |
| شابک                 | ۹۷۸-۶۰۰-۶۵۹۴-۰۹-۵                                                        |
| وضعیت فهرست نویسی    | قیفا.                                                                    |
| یادداشت              | عنوان اصلی: Impact on Composite Structures                               |
| یادداشت              | واژه نامه                                                                |
| موضوع                | مواد چند سازه - آزمون ضربه                                               |
| موضوع                | مواد چند سازه - آزمون ها                                                 |
| موضوع                | مواد چند سازه - خواص مکانیکی                                             |
| شناسنامه افزوده      | آشنای قاسمی، فرامرز، ۱۳۴۷-، مترجم                                        |
| شناسنامه افزوده      | دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی.                                           |
| رده بندی کنگره       | ۱۳۹۱ الف۲۳/م/۸ TA۴۱۸                                                     |
| رده بندی دیویی       | ۶۲/۱۱۸۵                                                                  |
| شماره کتابشناسی ملی  | ۳۰۳۷۷۷۷                                                                  |



دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی

|           |                                                                 |
|-----------|-----------------------------------------------------------------|
| عنوان     | ضربه بر روی سازه های کامپوزیتی                                  |
| ترجمه     | دکتر فرامرز آشنای قاسمی، استادیار دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی |
| چاپ اول   | تابستان ۱۳۹۲                                                    |
| انتشارات  | دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی                                   |
| لیتوگرافی | شرکت نماداندیش آرین                                             |
| چاپ       | شرکت نماداندیش آرین                                             |
| شمارگان   | ۱۰۰۰ جلد                                                        |
| قیمت      | ۲۵.۰۰۰ تومان                                                    |
| شابک      | ۹۷۸-۶۰۰-۶۵۹۴-۰۹-۵ ISBN: ۹۷۸-۶۰۰-۶۵۹۴-۰۹-۵                       |

کلیه حقوق این اثر برای مؤلفین و دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی محفوظ است.

نشانی: تهران، لویزان - کد پستی ۱۶۷۸۸ - صندوق پستی ۱۶۳ - ۱۶۷۸۵ - تلفن: ۲۲۹۷۰۰۶۰ - ۹  
نمابر: ۲۲۹۷۰۰۰۳ پست الکترونیکی: Publish@srttu.edu وب سایت: http://publish.srttu.edu

## چکیده

امروزه کامپوزیت‌ها (مواد مرکب) به‌نحو گسترده‌ای در کاربردهای مهندسی استفاده می‌شوند. یکی از مسائل مرتبط با سازه‌های کامپوزیتی، تأثیر ضربات اجسام خارجی بر روی آنهاست. زیرا ممکن است خرابی‌های قابل توجهی در داخل آنها رخ دهد، بدون آنکه این خرابی‌ها توسط چشم غیرمسلح قابل رؤیت باشند. چنین خرابی‌هایی می‌توانند در گستره وسیعی از سرعت‌های اجسام ضربه‌زننده رخ دهند. از جمله این موارد می‌توان به ضربه در سرعت پایین (مانند سقوط یک ابزار بر روی یک قطعه) که بسیار متداول است و یا برخورد در سرعت‌های بسیار بالا به‌سبب برخورد اجرام آسمانی بر روی یک سفینه فضایی اشاره کرد.

در این کتاب جدیدترین تحقیقات انجام گرفته در این مبحث بسیار مهم و جدید ارائه شده است. در این کتاب نحوه توسعه تخریب در حین ضربه تشریح شده، تأثیر خرابی ناشی از ضربه بر روی رفتار مکانیکی سازه‌ها بیان شده و روشهایی نیز برای پیش‌بینی و ارزیابی میزان تخریب این سازه‌ها بیان شده است. همچنین مثال‌هایی عددی برای تشریح هرچه بهتر این نکات ارائه شده است.

این کتاب نه تنها برای دانشجویان مقاطع تحصیلات تکمیلی، بلکه برای محققان و مهندسانی که به‌طور عملی با مواد کامپوزیت سروکار دارند مفید می‌باشد. با آنکه این کتاب ارائه‌گر به‌روزترین دانش موجود در زمینه دینامیک ضربه است، درک مطالب آن تنها مستلزم دانستن مفاهیم اولیه مکانیک مواد کامپوزیت می‌باشد.

هرچه کاربرد مواد کامپوزیت هر روز گسترده‌تر می‌شود. یکی از مهمترین مسائل مرتبط با آنها، تأثیر ضربات اجسام خارجی بر روی اینگونه سازه‌هاست. چنین ضرباتی عموماً در حین کارکرد قطعات رخ داده و از این‌رو، می‌توانند منجر به خرابی‌هایی در داخل قطعه شوند. این نوع خرابی‌ها از آن نظر حائز اهمیت می‌باشند که، با آنکه اغلب با چشم غیرمسلح قابل رویت نمی‌باشند، موجب کاهش شدیدی در استحکام و پایداری سازه‌ها می‌شوند. این مسأله منجر به انجام فعالیت‌ها و تحقیقات عمیقی شده که نتایج ناشی از آنها تاکنون به‌صورت صدها مقاله در کنفرانس‌ها و ژورنال‌های مختلف ارائه شده است.

تاکنون پیشرفت‌های مهمی در این باره صورت گرفته، نکات زیادی نیز در این زمینه روشن شده است. با این حال اگر کسی بخواهد احاطه خوبی بر روی این موضوع داشته باشد، باید حجم انبوهی از مقالات ارائه شده در این حوزه را مطالعه کند. پس از نوشتن سه مقاله مروری جامع درباره موضوع ضربه بر روی مواد کامپوزیت، احساس کردم که بهتر است این مبحث را به‌صورت یک کتاب ارائه کنم. مطالعه ضربه بر روی سازه‌های کامپوزیتی در برگیرنده سرفصل‌های مختلف زیادی است. از جمله این سرفصل‌ها می‌توان به مکانیک تماس، دینامیک سازه‌ای، استحکام، پایداری، خستگی، مکانیک تخریب و میکرومکانیک اشاره کرد. ضربه یک پدیده منفرد است که اثرات بسیار پیچیده‌ای را در پی داشته، آنچه در یک وضعیت خاص بسیار منطقی به نظر می‌رسد، ممکن است که در یک وضعیت دیگر کاملاً معکوس جلوه نماید. همین تنوع و پیچیدگی بود که مرا سال‌های متمادی به این موضوع علاقه‌مند نگاهداشته است. امید است که بتوانم آنچه را در طی آن سال‌ها کسب کرده‌ام، به‌نحو مطلوبی به شما خوانندگان این کتاب منتقل نمایم.

در این کتاب تلاش شده است که این بخش جدید از دانش به‌صورت یکپارچه، همراه با جزئیات و به‌نحو کاملاً مسبوطی به خوانندگان آن ارائه شود. به‌نظر می‌رسد که داشتن پایه‌ای از مکانیک جامدات و مکانیک مواد کامپوزیت به عنوان یک مرجع اولیه، چه برای دانشجویان مقاطع تحصیلات تکمیلی و چه برای مطالعات شخصی کافی باشد. در فصل‌های این کتاب، مسائلی به عنوان تمرین تدارک دیده شده است. دست و پنجه نرم کردن با آنها، خوانندگان کتاب را در فهم مطالب ارائه شده یاری می‌کند. امید است که خوانندگان کتاب پس از پایان هر بخش، با به‌کارگیری روشهای ارائه شده، قادر به حل و استنباط مسائل ارائه شده هر بخش باشند. برای مثال پس از خواندن فصل ۳، "دینامیک ضربه"، خواننده کتاب باید بفهمد که چه عواملی در انتخاب یک مدل ریاضی (به‌منظور پیش‌بینی تاریخچه نیروی تماس) دخیل می‌باشند. وی همچنین باید قادر به این باشد که چه گزینه منطقی را برای مسأله خاص پیش روی خود انتخاب نماید. محققان و فعالان مشغول در صنعت می‌توانند به‌سبب این نحوه ارائه گسترده موضوع، از این کتاب به عنوان

یکی از مراجع خود استفاده نمایند. البته فهرست جزئی‌تری از مراجع به کار گرفته شده نیز، برای علاقه‌مندان مایل به تعمیق هرچه بیشتر در مباحث ارائه شده، در انتهای کتاب آورده شده است.

دانش فعلی در برخی از زمینه‌ها به سطح مناسبی از بلوغ رسیده است. به عنوان مثال در زمینه چگونگی مدل‌کردن فرورفتگی موضعی توسط فرورونده‌های هموار در یک صفحه کامپوزیتی تقریباً توافق کلی بین محققان به دست آمده است. اما در دیگر زمینه‌ها، روشهای رایج موجود به طور کامل متقاعد کننده نمی‌باشند. این مسأله به ویژه در زمینه پیش‌بینی تخریب و خواص باقیمانده کامپوزیت‌های تخریب شده توسط ضربه حائز اهمیت می‌باشد. کتاب شامل هر دو نوع ضربه سرعت پایین و پرتابی است. ضربات ناشی از سرعت‌های بسیار بالا هنگامی رخ می‌دهند که یک فضا پیم با شهاب‌سنگ‌ها یا ذرات فضایی برخورد کند. سرعت ضربه در چنین برخوردهایی در مقیاس  $\text{km/s}$  می‌باشد. از آنجایی که مطالعات بسیار اندکی درباره اینگونه از ضربه بر روی سازه‌های کامپوزیتی انجام شده است، در این کتاب به مبحث مزبور پرداخته نشده است. اخیراً دریچه جدیدی از تحقیق بر روی موضوعاتی چون مواد هوشمند و سازه‌های هوشمند باز شده است. یکی از اهداف این زمینه‌ها، به کارگیری حسگرها و عملگرهایی است که توسط آنها بتوان از سالم بودن سازه در هر لحظه اطمینان حاصل کرد. تلاش‌هایی نیز در زمینه تعیین محل ضربه یا مشخص کردن محل و اندازه تخریب ناشی از ضربه صورت گرفته است. به سبب آنکه تعیین رفتار چنین حسگرها و عملگرهایی هوشمندی نیازمند به تشریح نحوه مدل‌سازی، روش‌های کنترل و فرآیندهای مشخصه‌سازی آنهاست، در این کتاب به آنها پرداخته نشده است. با این حال روشهای مدل‌سازی دینامیک ضربه و رفتار سازه‌های تخریب شده ارائه شده در این کتاب می‌توان برای مدل‌سازی چنین سازه‌های هوشمندی مفید باشد.

شایان ذکر است که در پی مطالعه کتاب حاضر، خود را مرهون محققان متعددی می‌دانم که در توسعه هرچه بیشتر این بخش از دانش، گام‌های بزرگی برداشته‌اند. من تلاش کرده‌ام که هر توسعه مهمی در این زمینه از دانش را ارائه دهم. یک کتاب معمولاً نتیجه تصمیم‌گیری یک نویسنده، به نیاز یا عدم نیاز به بیان مجموعه‌ای از مطالب گردآوری شده است. لذا مابین آنچه که می‌بایست به روشنی و گسترده‌گی بیان شود و خطر تحمیل بیش از اندازه مطلب به خواننده باید توازنی ایجاد شود تا کتاب برای مخاطبانش، سودمند باشد. در همین راستا، تقریباً هر یک از فصل‌های این کتاب را می‌شد چنان توسعه داد که هر یک خود منجر به چاپ یک کتاب شوند. با این حال امیدوارم که خوانندگان کتاب به نحوی به درک کافی در هر یک از زمینه‌های ارائه شده مورد علاقه‌شان برسند که خود قادر به دنبال کردن آن تا میزان مورد نظرشان شوند. ارائه فهرستی گسترده از مراجع و برخی مطالعات انجام شده درباره موضوعات ارائه شده نیز می‌تواند برای خوانندگان کتاب مفید باشد.

در انتها بر خود لازم می‌دانم که مراتب تشکر خود را از تصحیح کننده کتاب، فلورنس پادگت، به سبب همکاری مجدانه خود به من در این تلاش اعلام دارم. همچنین مراتب سپاس خود را از همسر من جین و پسرانم دنیس و مارک، به سبب آنکه اجازه دادند تا اوقات فراغتم را بر روی انجام این پروژه بگذارم، اعلام می‌دارم. مراتب تشکر ویژه خود را نیز نسبت به خانواده‌ام که همواره مرا به رسیدن رویاهایم تشویق کرده، نیز در طی کردن مدارج عالی تحصیل یاری رسانده‌اند اعلام می‌کنم. ای کاش پدرم زنده بود و این کتاب را می‌دید. در این صورت احتمالاً می‌توانست به خود (به سبب پرورش فرزندى چون من) بسیار ببالد.

www.ketab.ir

فصل دوم: قوانین تماس

۲.۱. مقدمه

۲.۲. تماس مابین دو جسم صلب الاستیک ایزوتروپ

۲.۳. فرورفتگی در تیرها

۲.۴. فرورفتگی صفحات

۲.۵. فرورفتگی در چندلایه

۲.۶. مدل‌های الاستوپلاستیک

۲.۷. نتیجه‌گیری

۲.۸. مسائل

فصل سوم: دینامیک ضربه

۳.۱. مقدمه

۳.۲. تئوری‌های تیرها

۳.۲.۱. خمش یک تیر تحت یک بار یکنواخت

۳.۲.۲. تئوری مرتبه بالاتر تیرها

۳.۲.۳. تئوری تیر تیموشنکو

۳.۲.۴. تئوری تیر برنولی-اولر

۳.۲.۵. بارگذاری استاتیکی تیرها

۳.۲.۶. بازیابی تنش‌های صحیح از مدل‌های تیر

۳.۲.۷. انتشار امواج هماهنگ

۳.۲.۷. ارتعاشات آزاد تیرها

۳.۲.۹. تأثیر غیرخطی بودن‌های هندسی

۳.۲.۱۰. خلاصه

۳.۲.۱۱. مسائل

|     |                                                               |
|-----|---------------------------------------------------------------|
| ۶۱  | ۳.۳. تئوری‌های صفحات                                          |
| ۶۲  | ۳.۳.۱. تئوری مرتبه‌ی اول تغییرشکل برشی                        |
| ۷۰  | ۳.۳.۲. تئوری کلاسیک صفحات (CPT)                               |
| ۷۱  | ۳.۳.۳. تئوری‌های مرتبه بالاتر صفحات (HOPT)                    |
| ۷۷  | ۳.۳.۴. تغییرشکل‌های استاتیکی صفحات                            |
| ۸۳  | ۳.۳.۵. انتشار امواج هماهنگ                                    |
| ۹۲  | ۳.۳.۶. ارتعاشات آزاد صفحات                                    |
| ۹۵  | ۳.۳.۷. پاسخ‌گذرای یک صفحه                                     |
| ۹۸  | ۳.۳.۸. مدل‌های تغییرات                                        |
| ۱۰۴ | ۳.۳.۹. تأثیر شرایط مرزی                                       |
| ۱۰۷ | ۳.۳.۱۰. خلاصه                                                 |
| ۱۰۸ | ۳.۳.۱۱. مسائل                                                 |
| ۱۰۹ | ۳.۴. مدل‌های ضربه                                             |
| ۱۰۹ | ۳.۴.۱. مدل‌های جرم- فنر                                       |
| ۱۱۳ | ۳.۴.۲. مدل‌های موازنه انرژی                                   |
| ۱۱۷ | ۳.۴.۳. پاسخ تیر برنولی- اولر به ضربه توسط یک جرم              |
| ۱۲۷ | ۳.۴.۴. ضربه بر روی یک صفحه تکیه‌گاه ساده (تئوری کلاسیک صفحات) |
| ۱۲۸ | ۳.۴.۵. ضربه بر روی یک صفحه تکیه‌گاه ساده (SDPT)               |
| ۱۴۶ | ۳.۴.۶. پاسخ تخمینی برای ضربه‌هایی با موج کنترل شده            |
| ۱۵۹ | ۳.۴.۷. خلاصه                                                  |
| ۱۶۰ | ۳.۴.۸. مسائل                                                  |
| ۱۶۰ | ۳.۵. تئوری پوسته‌ها                                           |
| ۱۶۱ | ۳.۵.۱. معادلات حرکت                                           |
| ۱۶۵ | ۳.۵.۲. صفحات با تکیه‌گاه ساده                                 |
| ۱۶۷ | ۳.۵.۳. مسائل                                                  |
| ۱۶۷ | ۳.۶. مقیاس‌بندی                                               |

## ۱۷۳ فصل چهارم: تخریب ناشی از ضربه با سرعت پایین

|     |                                                     |
|-----|-----------------------------------------------------|
| ۱۷۴ | ۴.۱. آزمون‌های ضربه                                 |
| ۱۸۰ | ۴.۲. مودهای واماندگی در تخریب ضربه‌ای در سرعت پایین |



|     |                                                          |
|-----|----------------------------------------------------------|
| ۱۸۰ | ۴.۲.۱. مورفولوژی تخریب ضربه‌ای در سرعت پایین             |
| ۱۸۴ | ۴.۲.۲. توسعه تخریب                                       |
| ۱۸۶ | ۴.۲.۳. مدل‌های کیفی برای پیش‌بینی قالب‌های لایه‌لایه شدن |
| ۱۸۸ | ۴.۳. روشهای تجربی برای تخمین تخریب                       |
| ۱۸۸ | ۴.۳.۱. روشهای غیرمخرب                                    |
| ۱۹۲ | ۴.۳.۲. روشهای مخرب                                       |
| ۱۹۲ | ۴.۳.۳. مشاهده توسعه تخریب در حین ضربه                    |
| ۱۹۳ | ۴.۴. پارامترهای مؤثر بر تخریب ضربه‌ای                    |
| ۱۹۳ | ۴.۴.۱. خواص مواد                                         |
| ۱۹۶ | ۴.۴.۲. سفتی جسم ضربه‌خورنده                              |
| ۱۹۷ | ۴.۴.۳. خصوصیات جسم ضربه‌رننده                            |
| ۱۹۹ | ۴.۴.۴. لایه‌چینی و دوختن                                 |
| ۲۰۰ | ۴.۴.۵. پیش بارگذاری                                      |
| ۲۰۱ | ۴.۴.۶. شرایط محیطی                                       |
| ۲۰۱ | ۴.۵. خلاصه                                               |
| ۲۰۳ | ۴.۶. مسائل                                               |

|     |                                    |
|-----|------------------------------------|
| ۲۰۵ | فصل پنجم: پیش‌بینی تخریب           |
| ۲۰۵ | ۵.۱. مقدمه                         |
| ۲۰۶ | ۵.۲. تخریب در چندلایه‌های ضخیم     |
| ۲۰۸ | ۵.۳. تخریب در چندلایه‌های نازک     |
| ۲۱۰ | ۵.۴. شروع تخریب                    |
| ۲۱۴ | ۵.۵. رشد لایه‌لایه شدن در حین ضربه |
| ۲۱۷ | ۵.۶. نتایج                         |
| ۲۱۸ | ۵.۷. مسائل                         |

|     |                      |
|-----|----------------------|
| ۲۱۹ | فصل ششم: خواص پسماند |
| ۲۱۹ | ۶.۱. مقدمه           |
| ۲۲۰ | ۶.۲. استحکام فشاری   |
| ۲۲۱ | ۶.۲.۱. روشهای آزمایش |

|     |                                                       |
|-----|-------------------------------------------------------|
| ۲۲۴ | ۶.۲.۲ نتایج تجربی                                     |
| ۲۳۲ | ۶.۲.۳ پیش‌بینی استحکام پسماند فشاری                   |
| ۲۳۴ | ۶.۳ کمانش                                             |
| ۲۳۷ | ۶.۳.۱ لایه‌لایه شدن‌های غشای نازک                     |
| ۲۴۰ | ۶.۳.۲ صفحه تیرهای لایه‌لایه شده                       |
| ۲۴۳ | ۶.۳.۳ کمانش صفحه- تیرهای دارای چندین لایه‌لایه‌شدگی   |
| ۲۴۵ | ۶.۳.۴ کمانش صفحات لایه‌لایه شده                       |
| ۲۴۹ | ۶.۴ استحکام پسماند کششی                               |
| ۲۵۰ | ۶.۴.۱ نتایج تجربی                                     |
| ۲۵۲ | ۶.۴.۲ پیش‌بینی استحکام پسماند کششی                    |
| ۲۵۶ | ۶.۵ استحکام پسماند خمشی                               |
| ۲۶۰ | ۶.۶ خستگی                                             |
| ۲۶۲ | ۶.۷ تأثیر تخریب ضربه‌ای بر روی رفتار دینامیکی سازه‌ای |
| ۲۶۶ | ۶.۸ مسائل                                             |

## ۲۶۷ فصل هفتم: ضربه بالستیک (پرتابی)

|     |                                           |
|-----|-------------------------------------------|
| ۲۶۷ | ۷.۱ مقدمه                                 |
| ۲۶۹ | ۷.۲ روشهای تجربی                          |
| ۲۷۰ | ۷.۳ حد پرتاب و سرعت پسماند جسم ضربه‌زننده |
| ۲۷۳ | ۷.۴ مودهای واماندگی                       |
| ۲۷۴ | ۷.۵ پیش‌بینی حد پرتاب                     |
| ۲۷۹ | ۷.۶ زره سرامیکی-کامپوزیتی                 |

## ۲۸۳ فصل هشتم: تعمیرات

|     |                                                         |
|-----|---------------------------------------------------------|
| ۲۸۳ | ۸.۱ مقدمه                                               |
| ۲۸۵ | ۸.۲ وصله‌های مکانیکی                                    |
| ۲۸۷ | ۸.۳ اتصالات چسبی                                        |
| ۲۸۸ | ۸.۳.۱ تنش‌های برشی و کنده‌شدن در اتصالات لب روی لب دابل |
| ۲۹۲ | ۸.۳.۲ تعمیر چسبی توسط وصله‌های فلزی                     |
| ۲۹۳ | ۸.۳.۳ تعمیرات چسبی کامپوزیتی                            |

|     |                                   |
|-----|-----------------------------------|
| ۲۹۳ | ۸.۳.۴. تعمیر چسبی پله‌دار شده     |
| ۲۹۳ | ۸.۳.۵. تعمیر سازه‌های ساندویچی    |
| ۲۹۴ | ۸.۳.۶. تزریق رزین                 |
| ۲۹۵ | ۸.۴. تعمیر کامپوزیت‌های ترموپلاست |

## فصل نهم: ضربه بر روی سازه‌های ساندویچی ۲۹۷

|     |                                                            |
|-----|------------------------------------------------------------|
| ۲۹۷ | ۹.۱. مقدمه                                                 |
| ۲۹۸ | ۹.۲. قوانین تماس                                           |
| ۳۰۰ | ۹.۲.۱. رفتار فشاری مواد هسته                               |
| ۳۰۳ | ۹.۲.۲. تماس مابین یک تیر ساندویچی و یک فرورونده استوانه‌ای |
| ۳۰۶ | ۹.۲.۳. تماس مابین یک صفحه ساندویچی و یک فرورونده کروی      |
| ۳۰۸ | ۹.۳. دینامیک ضربه                                          |
| ۳۰۹ | ۹.۴. تخریب ضربه‌ای                                         |
| ۳۰۹ | ۹.۴.۱. مودهای واماندگی                                     |
| ۳۱۲ | ۹.۴.۲. عوامل حاکم                                          |
| ۳۱۶ | ۹.۴.۳. سازه‌های ساندویچی ارتقاء یافته                      |
| ۳۱۶ | ۹.۴.۴. ضربات با سرعت بالا                                  |
| ۳۱۷ | ۹.۴. خواص پسماند                                           |

## پیوست ۱. مراجع ۳۲۱

## پیوست ۲. واژه‌نامه ۳۴۹