

مروری بر تحلیل کمانش سازه‌های ساخته‌شده از کامپوزیت‌های زمینه سرامیکی

نوع مقاله: علمی پژوهشی

محمدحسین دیده‌بان دوگوری^۱، مهدی حسینی^{۲*}^۱ دانشجوی کارشناسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران^۲ استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران

* m.hosseini27@gmail.com

چکیده:

کامپوزیت‌های زمینه سرامیکی (CMCS) به دلیل خواصی مانند مقاومت حرارتی بسیار بالا، پایداری شیمیایی، استحکام ویژه و مقاومت به شوک حرارتی و خوردگی، در سال‌های اخیر به یکی از مواد پرکاربرد در صنایع پیشرفته تبدیل شده‌اند. با گسترش استفاده از این مواد در ساخت سازه‌های سبک و مقاوم، به‌ویژه در صنایع هوافضا، توربین‌های گازی، خودروهای پیشرفته و تجهیزات دفاعی، تحلیل دقیق رفتار کمانشی آن‌ها اهمیت زیادی یافته است. در این مقاله، مروری جامع بر تحلیل کمانش سازه‌های ساخته‌شده از CMCها ارائه شده است. در ابتدا ویژگی‌های ترمومکانیکی این مواد مورد بررسی قرار گرفته و سپس مفاهیم بنیادی کمانش، تفاوت میان کمانش موضعی و کلی، و روش‌های متداول عددی و تحلیلی (مانند روش انرژی، روش اجزاء محدود، و نوار محدود) معرفی شده‌اند. در ادامه، رفتار کمانشی انواع مختلف سازه‌های CMC شامل صفحات، پوسته‌ها و ستون‌ها تحت شرایط مختلف دما، بارگذاری و شرایط مرزی بررسی شده است. همچنین اثر پارامترهایی مانند ناهمسانگردی، lay-up لایه‌ها، وجود نقص‌های ساختاری، ترک، و خواص وابسته به دما در رفتار کمانشی تحلیل شده است. در پایان، کاربردهای صنعتی CMCها در حوزه‌های مختلف و چالش‌های موجود در طراحی و تحلیل دقیق این مواد مرور شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که به‌منظور دستیابی به طراحی دقیق‌تر و عملکرد مطمئن‌تر، نیاز به توسعه روش‌های تحلیلی-تجربی پیشرفته، مدل‌سازی غیرخطی چندمقیاسی و تست‌های تجربی در شرایط واقعی اجتناب‌ناپذیر است.

اطلاعات مقاله:

دریافت: ۲۰ شهریور ۱۴۰۴

پذیرش: ۱۶ دی ۱۴۰۴

صفحه ۷۶ تا صفحه ۱۰۳

در دسترس در نشانی:

www.ijcse.ir

زبان نشریه: فارسی

شاپا چاپی: ۲۳۵۲-۲۳۲۲

شاپا الکترونیکی:

۳۰۰۳-۲۷۸۳

کلیدواژه:

تحلیل کمانش، سازه کامپوزیتی، زمینه سرامیکی.

20.1001.1.23222352.1403.13.2.4.2

کد DOR:

۱- مقدمه

۱-۱- معرفی کامپوزیت‌های زمینه سرامیکی (CMC)^۱

CMCها یک پیشرفت عمده در علم و مهندسی مواد هستند زیرا ویژگی‌های فوق‌العاده سرامیک‌ها را با استحکام و سختی

الیاف ترکیب می‌کنند [۱، ۲]. به دلیل ویژگی‌های متمایز خود که عملکرد و دوام بهتری در محیط‌های سخت ارائه می‌دهند، این کامپوزیت‌های پیشرفته توجه زیادی را در صنایع مختلف جلب کرده‌اند [۳، ۴]. CMCها یک زیرگروه از کامپوزیت‌ها و

¹ Ceramic matrix composite



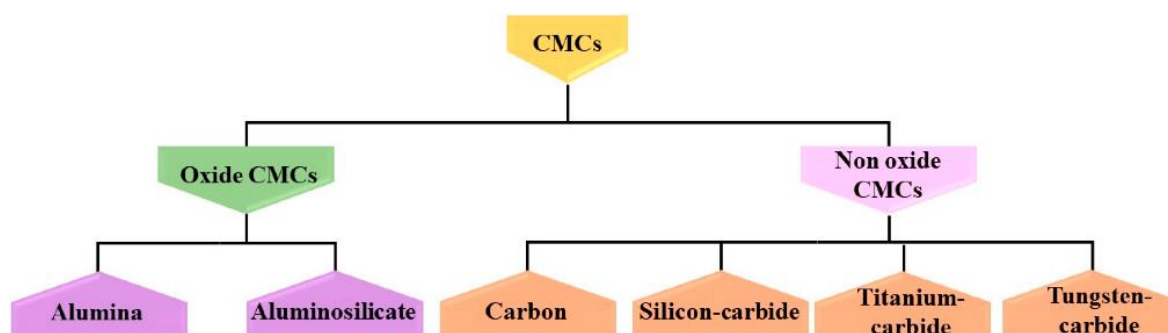
کرده است. مقاومت بالای CMCها در برابر سایش، انبساط حرارتی اندک، و مقاومت عالی در برابر خوردگی نیز موجب بهبود عملکرد آنها در محیطهای دشوار و چالش برانگیز می شود [۱۱].

همان طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، CMCها می توانند براساس ماهیت ماتریس به دو دسته اکسیدی و غیراکسیدی دسته بندی شوند [۱۲].

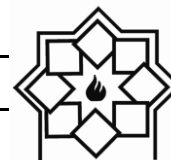
کامپوزیت های ماتریس سرامیکی اکسیدی (O-CMC) ترکیبی از فیبرهای سرامیکی با ماتریس های سرامیکی اکسیدی هستند. این گروه از کامپوزیت ها به دلیل دارا بودن ویژگی هایی همچون پایداری حرارتی در دماهای بالا، چگالی پایین، مقاومت مکانیکی مطلوب و مقاومت عالی در برابر خوردگی، امکان استفاده در شرایط با الزامات شدید حرارتی و مکانیکی را فراهم می سازند. رفتار شکست این مواد به صورت شبه چکش خوار و مقاوم در برابر آسیب است که کاربرد آنها را در محیط های سخت گسترش می دهد [۱۳].

اجزای اصلی O-CMCها از ترکیبات معدنی اکسیدی عناصر فلزی یا شبه فلزی با اکسیژن تشکیل شده اند؛ از جمله آلومینا، بریلیا، سریا و زیرکونیا [۱۲]. با این حال، محدوده ی کاربرد این کامپوزیت ها معمولاً تا دمای ۱۲۰۰ درجه سانتی گراد محدود می شود [۱۴].

همچنین سرامیک ها در تحقیقات مواد هستند. آنها شامل الیاف یا ذراتی هستند که در یک ماتریس سرامیکی قرار داده شده اند [۵]. CMCها به خاطر توانایی خود در تحمل دماهای بسیار بالا و خوردگی، و همچنین سبکی و ثبات شیمیایی قوی خود معروف هستند، که به این معنا است که با دیگر مواد یا مواد شیمیایی واکنش نمی دهند. به همین دلیل، CMCها برای کاربردهایی با الزامات مکانیکی و حرارتی سخت ایده آل هستند [۶]. توسعه CMCها که عملکرد بالاتری در کاهش وزن و بهبود کارایی سوخت ارائه می دهند، در سال های اخیر توجه بیش تری را جلب کرده است. CMCها برای برآورده کردن نیاز به مواد سبک در صنعت هوا فضا، خودروسازی و انرژی توسعه یافته اند [۷، ۸]. استفاده از الیاف سبک امکان کاهش قابل توجهی در وزن کلی را در عین حفظ استحکام و سختی بالا فراهم می کند که این ویژگی آنها را برای کاربردهایی که کاهش وزن اهمیتی حیاتی دارد، جذاب می سازد [۹]. CMC دارای چندین ویژگی نسبت به مواد متعارف است. اولاً، چگالی پایین آنها به کاهش وزن کمک می کند، که باعث افزایش راندمان سوخت و گسترش ظرفیت بار در کاربردهای خودروسازی و هوافضا می شود [۱۰]. قابلیت تحمل دمای بالا و پایداری حرارتی بی نظیر، CMCها را به انتخابی مناسب برای قطعاتی مانند پره های توربین گاز تبدیل



شکل ۱- طبقه بندی CMCها براساس ماهیت ماتریس [۱۲]



بخش اصلی CMC‌های غیراکسیدی را تشکیل می‌دهند [۱۷]. هرچند اجزای این کامپوزیت‌ها ذاتاً بسیار شکننده‌اند، ترکیب آن‌ها در قالب ساختارهای مرکب موجب افزایش قابل توجه دوام مکانیکی می‌گردد. با وجود این، CMC‌های غیراکسیدی در شرایط دمای بالا معمولاً مقاومت محدودی در برابر اکسیداسیون و خوردگی دارند [۱۲]. ترکیبات مختلف این کامپوزیت‌ها ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی گوناگونی را عرضه می‌کنند و در نتیجه نیازمند فناوری‌های تولید خاص و پیچیده هستند که دامنه‌ی کاربرد صنعتی آن‌ها را تا حدی محدود می‌کند.

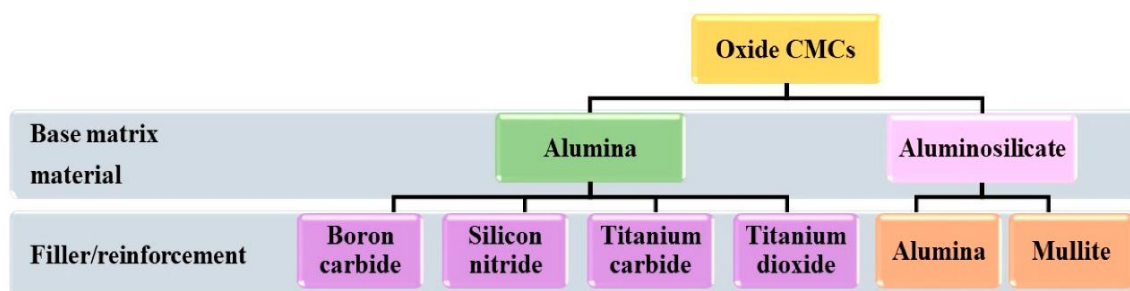
مطابق با مطالعات موجود، CMC‌های غیراکسیدی به‌عنوان انتخاب غالب برای کاربردهای با دمای بالا در میان انواع مواد کامپوزیتی مطرح شده‌اند [۱۸]. در شکل ۳، ترکیب نمونه‌ای از CMC‌های غیراکسیدی نمایش داده شده است که شامل مواد اولیه‌ی مورد استفاده به‌عنوان ماتریس و تقویت‌کننده برای کاربردهای مختلف صنعتی می‌باشد [۱۲].

علت این محدودیت به کاهش عملکرد مکانیکی فیبرهای تقویت‌کننده‌ی اکسیدی در دماهای بالا بازمی‌گردد که موجب افت قابل توجه در مقاومت کششی کامپوزیت می‌شود [۱۵]. همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده، کامپوزیت‌های O-CMC از نظر ترکیب در دو دسته‌ی اصلی قابل طبقه‌بندی‌اند:

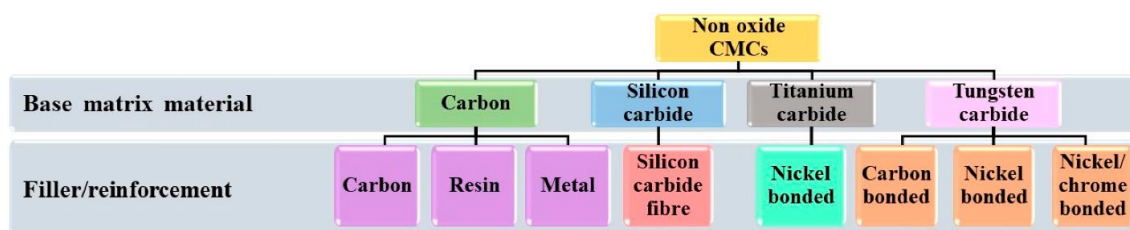
۱. ماتریس‌های اکسید/اکسید که در آن هم ماده‌ی زمینه و هم تقویت‌کننده اکسیدی هستند.

۲. ماتریس‌های اکسید/غیراکسید که در آن ماده‌ی زمینه اکسید بوده، اما تقویت‌کننده از نوع غیراکسید است [۱۲، ۱۶].

در مقابل، کامپوزیت‌های ماتریس سرامیکی غیراکسیدی به دلیل خواص مکانیکی و حرارتی برتر، در سال‌های اخیر توجه قابل توجهی را در تحقیقات علمی به خود جلب کرده‌اند [۱۲]. این کامپوزیت‌ها از یک ماتریس پایه‌ی غیراکسیدی و یک فاز تقویت‌کننده تشکیل شده‌اند که ممکن است از جنس سرامیک، فلز، پلیمر یا مواد دیگر باشد. سرامیک‌های فنی با پیوندهای کووالانسی، نظیر کاربیدها و نیتریدهای غیرسازنا،



شکل ۲- دسته‌بندی O-CMC‌ها [۱۲]



شکل ۳- دسته‌بندی CMC‌های غیراکسیدی [۱۲]



۱-۲- اهمیت تحلیل کمانش در طراحی سازه‌ها

تحلیل کمانش یکی از مسائل حیاتی در طراحی سازه‌های تحت فشار محوری است، چرا که شکست ناشی از کمانش معمولاً به صورت ناگهانی و غیرقابل پیش‌بینی رخ می‌دهد و می‌تواند به فروپاشی کامل سازه منجر شود [۱۹]. برخلاف شکست ناشی از تسلیم یا گسیختگی مواد، کمانش در بسیاری از موارد در بارهایی بسیار کم‌تر از ظرفیت نهایی ماده اتفاق می‌افتد، که آن را به یکی از حالت‌های بحرانی شکست در اجزای فشاری مانند ستون‌ها، مهاربندها و پوسته‌ها تبدیل می‌کند [۲۰]. در سیستم‌های سازه‌ای باریک و بلند یا اعضای که دارای نسبت طول به ضخامت زیاد هستند، پایداری هندسی به عامل تعیین‌کننده‌ای در عملکرد تبدیل می‌شود. کمانش معمولاً در این اعضا زمانی رخ می‌دهد که انرژی کرنشی در اثر فشار فشاری، به‌طور ناگهانی به انرژی کینتیکی تبدیل شده و باعث تغییر شکل ناپایدار و شدید می‌شود [۲۱]. تحلیل‌های کلاسیکی مانند معادله اویلر برای ستون‌های ایده‌آل، بنیان اولیه تحلیل کمانش را تشکیل می‌دهند:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(KL)^2} \quad (1)$$

که در آن E مدول الاستیسیته، I ممان اینرسی مقطع، L طول مؤثر عضو و K ضریب طول مؤثر است. اما در عمل، اغلب اعضای سازه‌ای تحت تأثیر عواملی مانند بارگذاری غیرمحوری، نامنظمی هندسی، نقص‌های ساخت، و شرایط مرزی پیچیده قرار دارند؛ لذا لازم است از تحلیل‌های عددی و اجزای محدود برای پیش‌بینی رفتار کمانشی استفاده شود [۲۲]. در طراحی مدرن، تحلیل کمانش نه تنها برای جلوگیری از شکست اولیه، بلکه برای بهینه‌سازی طراحی با استفاده از

مصالح حداقل نیز اهمیت دارد. در سازه‌های سبک‌وزن، همچون فضاپیماها یا سازه‌های مهندسی عمران با دهانه بلند، استفاده از مقاطع نازک باعث افزایش حساسیت به کمانش می‌شود [۲۳]. همچنین در طراحی مقاوم در برابر زلزله، تحلیل کمانش جانبی-پیچشی در تیرها و قاب‌ها، به‌منظور ارزیابی ظرفیت پایداری سازه، جایگاه ویژه‌ای دارد. ترکیب این تحلیل‌ها با تحلیل‌های غیرخطی و رفتار پساکمانشی^۱ به طراحان این امکان را می‌دهد که ایمنی و عملکرد واقعی سازه را دقیق‌تر ارزیابی کنند [۲۴].

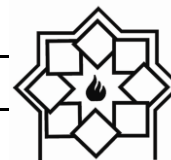
۲- ویژگی‌های مکانیکی CMCها

کامپوزیت‌های زمینه سرامیکی (CMC) ترکیبی از ماتریس سرامیکی و الیاف تقویت‌کننده هستند که توانسته‌اند خواص برجسته‌ای برای کاربرد در محیط‌های سخت به‌وجود آورند. این خواص شامل موارد زیر هستند:

۱-۲- مقاومت حرارتی بالا

CMCها توانایی عملکرد در دماهای بالا (تا حدود ۱۶۰۰ درجه سانتی‌گراد) را دارا هستند، در حالی که فلزات معمولی در این دماها دچار تغییر فاز یا اکسیداسیون می‌شوند. این ویژگی موجب شده است که از CMCها در محفظه احتراق موتورهای جت و اجزای داغ توربین‌ها استفاده شود [۲۵]. گونه‌های ویژه‌ای از CMCها، که به‌عنوان UHTCMC شناخته می‌شوند، تا دمای بیش از ۲۰۰۰°C کارایی دارند؛ این امر به‌ویژه در نمونه‌های C/C و SiC/SiC محقق شده است که برای محافظت در برابر فرسایش بالا به پوشش سیلیکایی مجهز شده‌اند [۲۶]. استحکام مکانیکی بالا، به‌ویژه در دماهای بالاتر

¹ Post-Buckling Behavior



از ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد، یکی از ویژگی‌های مهم CMCهاست. خواصی مانند مدول الاستیسیته و مقاومت خمشی با استفاده از تقویت‌کننده‌هایی مثل فیبر کربن یا SiC حفظ می‌شوند [۲۷]. برخلاف آلیاژهای نیکل یا تیتانیوم که در دماهای بالا اکسیده یا نرم می‌شوند، CMCها ساختار بلوری خود را حفظ کرده و خواص مکانیکی‌شان به شکل قابل توجهی کاهش نمی‌یابد. این مواد همچنین نیازی به سامانه خنک‌کاری پیچیده ندارند که خود باعث کاهش وزن و پیچیدگی در طراحی می‌شود [۲۸]. خواص حرارتی بالا در CMCها عمدتاً ناشی از ترکیب زیرسیستم‌های سرامیکی مانند Al_2O_3 ، SiC یا ZrB_2 در ماتریس است. الیاف تقویت‌کننده (مانند SiC فیبر) نقش مؤثری در حفظ ساختار در برابر ترک‌خوردگی حرارتی دارند [۲۹]. از آنجا که ضریب انبساط حرارتی در این مواد پایین و توزیع تنش یکنواخت‌تر است، تنش‌های حرارتی به سختی موجب شکست می‌شوند. تحقیقات نشان داده‌اند که مدول الاستیسیته و مقاومت فشاری CMCها در دماهای ۱۰۰۰ تا ۱۴۰۰ درجه سانتی‌گراد تنها کاهش جزئی دارند. برای نمونه، نمونه‌های SiC/SiC حتی پس از قرارگیری در دمای $1300^{\circ}C$ برای ۱۰۰۰ ساعت، دچار تغییر شکل قابل توجهی نمی‌شوند [۳۰].

۲-۲- چقرمگی شکست و کنترل ترک

یکی از چالش‌های اصلی در استفاده از سرامیک‌های سنتی، شکنندگی بالا و چقرمگی شکست بسیار پایین آن‌هاست. در مقابل، کامپوزیت‌های زمینه سرامیکی (CMC) با بهره‌گیری از تقویت‌کننده‌های فیبری یا ذره‌ای، توانسته‌اند این ضعف را

تا حد زیادی رفع کنند و رفتار مکانیکی نسبتاً چقرمه‌تری از خود نشان دهند [۳۱]. سرامیک‌های خالص معمولاً دارای چقرمگی شکست پایین‌تر از $20 MPa m^{0.5}$ هستند و به دلیل فقدان مکانیزم‌های تسهیل حرکت ناپیوستگی‌ها (مثل نابجایی‌ها در فلزات)، در برابر تمرکز تنش و ترک‌های میکروسکوپی بسیار حساس‌اند [۳۲]. در CMCها، الیاف سرامیکی (مانند SiC یا C فیبر) درون ماتریس سرامیکی قرار گرفته‌اند و با ایجاد مکانیزم‌هایی مانند:

- جدادگی الیاف از ماتریس
- کشیدگی تدریجی الیاف
- بازتوزیع تنش اطراف ترک

باعث افزایش چشم‌گیر انرژی شکست می‌شوند [۳۳، ۳۴]. این مکانیزم‌ها به‌جای انتشار ناگهانی ترک، آن را به شکلی کنترل‌شده هدایت می‌کنند و موجب می‌شوند ماده رفتار شبه‌چقرمه^۱ از خود نشان دهد. در برخی از سیستم‌های SiC/SiC، چقرمگی شکست تا $10-8 MPa m^{0.5}$ نیز گزارش شده است، که چند برابر بیش‌تر از سرامیک‌های تک‌فاز است [۳۵]. این مقادیر تحت تأثیر عوامل متعددی مانند نوع پوشش روی الیاف، فاصله میان آن‌ها، و روش ساخت قرار دارند. برای جلوگیری از چسبندگی شدید الیاف به ماتریس و تسهیل جدایش الیاف، معمولاً از پوشش‌های میانی نظیر BN یا PyC استفاده می‌شود. این پوشش‌ها نقش بحرانی در ایجاد سازوکار جذب انرژی دارند و مانع از شکست ترد ناگهانی کل ساختار می‌شوند [۳۶]. جهت چیدمان الیاف نیز تأثیر مستقیم در کنترل مسیر و شدت رشد ترک دارد. آرایش متقارن یا چندمحوره می‌تواند باعث افزایش پایداری ترک و تأخیر در شکست کل سیستم شود

¹ pseudo-ductile



[37]. رفتار چقرمه‌ی CMC ها در طراحی قطعاتی که در معرض تنش‌های دینامیکی، بارهای چرخه‌ای یا شوک حرارتی هستند اهمیت ویژه‌ای دارد. برای مثال، در تیغه‌های توربین یا ترمزهای هواپیما که بارهای مکانیکی و حرارتی ترکیبی وجود دارد، توانایی کنترل ترک یکی از عوامل کلیدی دوام ساختار است [38].

۲-۳- مقاومت به شوک حرارتی

وجود الیاف باعث تعدیل بهتر تنش‌های ناشی از انبساط‌های حرارتی و در نتیجه کاهش احتمال ترک حرارتی می‌شود. این خاصیت CMC ها را مناسب برای شرایطی مانند ترمز دیسکی با تغییرات دما (گرم‌شدن و سریع خنک‌شدن) می‌کند [39]. در بسیاری از کاربردها، مانند ترمز هواپیما یا پوشش حرارتی فضاپیما، تغییرات دمایی ناگهانی رخ می‌دهد. سرامیک‌های خالص در چنین شرایطی شکننده عمل می‌کنند، اما CMC ها به دلیل حضور فازهای فیبری، مقاومت بالاتری در برابر شوک حرارتی دارند [40]. شوک حرارتی زمانی مشکل‌ساز می‌شود که اختلاف دمایی در سطح و عمق ماده منجر به تنش حرارتی بالا شود. اگر این تنش از مقاومت شکست ماده بیش‌تر باشد، ترک خوردگی یا شکست کلی رخ خواهد داد [41]. سرامیک‌های سنتی به دلیل ضریب انبساط حرارتی بالا، هدایت حرارتی پایین، و فقدان مکانیزم جذب تنش، اغلب دچار ترک خوردگی در هنگام گرمایش یا سرمایش سریع می‌شوند. CMC ها به چند دلیل اصلی در برابر شوک حرارتی مقاوم‌تر از سرامیک‌های سنتی هستند:

- i. الیاف سرامیکی (مانند SiC یا کربن) به‌عنوان مسیری برای پخش تنش و کنترل ترک عمل می‌کنند.
- ii. ضریب انبساط حرارتی پایین‌تر در این مواد باعث کاهش

تمرکز تنش حرارتی می‌شود.

iii. وجود رابط ضعیف کنترل‌شده بین الیاف و ماتریس به جدایش کنترل‌شده ترک‌ها و جذب انرژی کمک می‌کند [42، 43].

iv. هدایت حرارتی بهتر (در C/C و برخی SiC/SiC ها) باعث پخش سریع‌تر حرارت و کاهش گرادیان دما در مقیاس محلی می‌شود [44].

مطالعات تجربی نشان داده‌اند که نمونه‌های SiC/SiC و C/C در معرض سیکل‌های متعدد حرارتی (مثلاً ۱۰۰۰ سیکل از ۲۵°C تا ۱۳۰۰°C) بدون شکست ظاهری یا کاهش چشمگیر در خواص مکانیکی باقی مانده‌اند [45]. در تحقیقی توسط NASA، کامپوزیت‌های C/SiC تحت شوک حرارتی در هوا و در دمای ۱۵۰۰°C عملکردی پایدارتر از سوپرآلیاژهای نیکل از خود نشان دادند [46].

مقاومت به شوک حرارتی در کاربردهایی مانند:

- ترمز دیسکی خودروهای مسابقه‌ای
- نازل‌های خروجی موتورهای جت
- پوشش‌های حرارتی فضاپیماها
- پره‌های داغ توربین

نقش حیاتی دارد. در این محیط‌ها، سازه نه تنها باید دماهای بالا را تحمل کند، بلکه باید در برابر تغییرات ناگهانی دما نیز پایدار باقی بماند [47، 48].

در حالی که سرامیک‌هایی مانند ZrO_2 یا Al_2O_3 ممکن است در شوک‌های حرارتی شدید ترک بردارند، CMC ها معمولاً ابتدا ترک‌های سطحی تولید می‌کنند که به دلیل وجود الیاف و انرژی جذب‌شده در ناحیه ماتریس، گسترش نمی‌یابند. این رفتار موجب می‌شود که CMC ها حتی پس از چندین شوک



حرارتی شدید، هنوز عملکرد قابل قبولی داشته باشند [۴۹]. کامپوزیت‌های زمینه سرامیکی (CMC) به‌طور قابل ملاحظه‌ای در عملکرد مکانیکی و حرارتی از آلیاژهای فلزی متداول پیشی می‌گیرند، به‌ویژه هنگامی که در معرض شرایط عملیاتی با درجه حرارت بالا قرار می‌گیرند. همان‌گونه که در جدول ۱ به تفصیل بیان گردیده است، سیستم‌های CMC نظیر SiC/SiC و C/SiC مزایایی چون دستیابی به حداکثر دمای سرویس بالاتر، ارتقاء مقاومت در برابر خزش و نسبت استحکام به وزن بهینه را فراهم می‌آورند. این مجموعه از خواص ممتاز، CMCها را به گزینه‌ای ایده‌آل برای کاربری‌های ساختاری حساس در سامانه‌های پیشرفته هوافضا و صنایع انرژی تبدیل می‌کند؛ حوزه‌هایی که در آن‌ها تنش‌های حرارتی منجر به فرسایش و تخریب ساختاری قابل توجه در مواد فلزی می‌گردد [۵۰، ۵۱].

۲-۴- مقاومت شیمیایی و اکسیداسیون

ترکیباتی مانند C/SiC [۵۶] یا SiC/SiC [۵۷] دارای پوشش محافظ سیلیکا هستند که در مواجهه با اکسیژن و بخار، از

اکسید شدن بیش‌تر جلوگیری می‌کند. این ویژگی به‌ویژه برای کاربرد در محیط‌های خورنده اهمیت دارد [۵۸]. در محیط‌های خورنده، مانند اتمسفر موتورهای احتراقی یا محیط‌های اکسیدکننده، CMCها مقاومت بهتری نسبت به فلزات و آلیاژهای متداول دارند. ترکیب‌هایی مانند SiC/SiC یا C/SiC به دلیل پایداری شیمیایی بالای سیلیکون کاربید، دچار خوردگی و اکسیداسیون شدید نمی‌شوند [۲۷]. ماتریس‌های سرامیکی مانند SiC، Al_2O_3 و ZrO_2 دارای ساختار بلوری پایدار هستند که در برابر اکثر عوامل شیمیایی (اسیدها، بازها، نمک‌های مذاب و گازهای خورنده) واکنش‌پذیری کمی دارند. به‌ویژه SiC، رایج‌ترین فاز ماتریسی در CMCها، در بسیاری از شرایط محیطی واکنش‌ناپذیر باقی می‌ماند [۵۹]. در محیط‌های با دمای بالا و حضور اکسیژن، اگرچه اکسیداسیون اجتناب‌ناپذیر است، اما اغلب یک لایه سطحی SiO_2 تشکیل می‌شود که نقش سد محافظ دارد و از نفوذ بیش‌تر اکسیژن جلوگیری می‌کند [۶۰]. با افزایش دما، خصوصاً در بازه‌های $1000-1400^{\circ}C$ ، لایه SiO_2 ممکن است شکننده یا متخلخل شود و به مرور زمان ترک بخورد یا از سطح جدا شود.

جدول ۱- مقایسه خواص مکانیکی و حرارتی CMCها و مواد مرسوم

مواد	چگالی (g/cm^3)	حداکثر دما ($^{\circ}C$)	نسبت استحکام به وزن	مقاومت خزشی	کاربرد معمول	مرجع
فولاد سازه‌ای	~۷/۸	~۶۰۰	کم	ضعیف	مخازن تحت فشار، قاب‌های معمولی	[۵۲]
آلیاژهای تیتانیوم	~۴/۵	~۷۰۰	متوسط	متوسط	سازه هوافضایی	[۵۳]
سوپرآلیاژهای پایه نیکل	~۸/۹	~۱۰۰۰	متوسط	خوب	پره‌های توربین	[۵۴]
Sic/sic cmc	۲/۵-۲/۷	>۱۴۰۰	بسیار بالا	عالی	بخش داغ توربین، پنل‌های هوافضا	[۵۱، ۵۰]
c/sic cmc	۲/۲-۲/۵	>۱۶۰۰	بسیار بالا	عالی	دیسک‌های ترمز، سیستم‌های حفاظت حرارتی	[۵۵، ۵۰]



در این حالت، اکسیداسیون زیرسطحی الیاف یا ماتریس می‌تواند رخ دهد که خواص مکانیکی را به شدت تضعیف می‌کند [۶۱]. در محیط‌های حاوی بخار آب (مثلاً در توربین‌های گاز یا موتورهای جت)، خوردگی ناشی از واکنش بخار با SiC (به تولید Si(OH)_4 گازی) بسیار خطرناک‌تر از اکسیداسیون خشک است. این فرآیند می‌تواند ساختار را در طی زمان تحلیل برده و به شکست منجر شود [۶۲].

برای مقابله با خوردگی و اکسیداسیون شدید، از پوشش‌هایی تحت عنوان پوشش‌های زیست‌مانع^۱ (EBC) استفاده می‌شود. این پوشش‌ها (معمولاً از جنس $\text{Y}_2\text{Si}_2\text{O}_7$ ، BSAS یا Mullite) روی سطح کامپوزیت اعمال می‌شوند و مانع تماس مستقیم اکسیژن یا بخار آب با فاز SiC می‌گردند [۶۳]. پوشش‌های EBC تا دماهای 1500°C عملکرد دارند، در سیکل‌های حرارتی پایدار می‌مانند، با زیرلایه تطابق حرارتی بهتری دارند، بنابراین دچار ترک یا پوسته‌شدگی نمی‌شوند [۶۴]. در تست‌های سیکلی حرارتی با بخار آب در دمای 1300°C ، قطعات بدون پوشش EBC در کم‌تر از ۲۰۰ ساعت دچار افت خواص شدند، در حالی که نمونه‌های پوشش‌دار تا ۱۰۰۰ ساعت عملکرد پایدار نشان دادند [۶۵]. همچنین، پوشش‌های چندلایه جدید با طراحی تدریجی ضریب انبساط، مقاومت به ترک ناشی از اختلاف حرارتی را افزایش داده‌اند [۶۶].

۲-۵- نسبت بالای استحکام به وزن

CMC‌هایی مانند C/SiC و SiC/SiC دارای چگالی متوسط حدود 2.5 تا 3.0 g/cm^3 هستند، در حالی که فلزاتی مانند فولاد، 7.8 g/cm^3 ، آلومینیوم (2.7 g/cm^3) و آلیاژهای نیکل

(8.9 g/cm^3) چگالی‌های بسیار بالاتری دارند [۶۷]. حتی با استحکام پایین‌تر، نسبت استحکام به وزن CMC بیش‌تر از بسیاری از فلزات سنگین است [۶۸]. ویژگی خاص CMC‌ها این است که استحکام خود را در دماهای بالا نیز حفظ می‌کنند، در حالی که آلیاژهای فلزی در دمای بالا دچار افت شدید خواص می‌شوند؛ CMC‌ها تا دمای 1500 – 1200°C پایداری مکانیکی دارند. آلیاژهای تیتانیوم و آلومینیوم در دماهای بالاتر از 600°C دچار افت عملکرد می‌شوند [۶۹، ۷۰]. بنابراین، نسبت استحکام به وزن واقعی CMC‌ها در محیط‌های دمابالا حتی بیش‌تر از آن چیزی است که در شرایط اتاق اندازه‌گیری می‌شود. در CMC‌ها می‌توان با انتخاب نوع الیاف (مانند SiC، کربن یا ZrO_2)، زاویه چیدمان و روش تولید، ساختاری تولید کرد که هم سبک و هم مستحکم باشد. این امکان مهندسی خواص مکانیکی، باعث بهینه‌سازی بیش‌تر وزن در کاربردهای حساس می‌شود [۷۱]. در صنعت هوافضا، استفاده از CMC‌ها در بخش‌های داغ موتور، نازل‌ها و صفحات محافظ حرارتی می‌تواند تا ۳۰ تا ۴۰٪ کاهش وزن در مقایسه با فلزات سنتی ایجاد کند [۷۲]. در موتور LEAP شرکت GE، استفاده از پره‌های SiC/SiC باعث کاهش چندصد پوندی وزن موتور، افزایش راندمان سوخت و کاهش گازهای آلاینده شده است [۷۳].

۲-۶- پایداری در برابر خزش^۲

خزش به معنای تغییر شکل تدریجی یک ماده تحت تنش ثابت در دمای بالا است. در بسیاری از کاربردهای مهندسی—به‌ویژه در موتورهای جت، توربین‌های گاز، راکتورها و محیط‌های

² Creep

¹ Environmental barrier coatings



CMC‌های نسل جدید، استفاده از الیاف ریزدانه SiC با روکش‌های BN یا PyC به کاهش نرخ خزش و افزایش طول عمر کمک شایانی کرده است [۸۰]. همچنین، مدل‌سازی چندمقیاسی امکان پیش‌بینی دقیق‌تر رفتار خزش را در طراحی فراهم کرده است [۸۱].

۲-۷- روش ساخت و کنترل گسترده خواص

یکی از مزایای اساسی کامپوزیت‌های زمینه‌سرامیکی نسبت به سرامیک‌های سنتی یا فلزات، قابلیت مهندسی خواص در سطح میکرو و ماکرو از طریق روش‌های ساخت متنوع است. بسته به نوع کاربرد (تحمل دمای بالا، مقاومت در برابر خزش، یا مقاومت به شوک حرارتی)، می‌توان با انتخاب مناسب فرآیند تولید، خواص مکانیکی، حرارتی، و شیمیایی مورد نظر را به‌دقت تنظیم کرد. اکثر فرآیندهای ساخت CMC‌ها شامل سه مرحله کلیدی هستند:

- تهیه‌ی پیش‌فرم الیاف تقویت‌کننده (مانند SiC، C یا آلومینا)، با بافت خاص یا lay-up دلخواه
- نفوذدهی ماتریس به درون پیش‌فرم، با استفاده از یکی از فرآیندهای زیر
- پرداخت حرارتی نهایی برای متراکم‌سازی، کنترل تخلخل، یا ایجاد خواص سطحی [۸۲]

فرآیندهای متداول ساخت، به شرح زیر می‌باشند:

الف) CVI^۱

در این روش، بخارات واکنشی (مانند $\text{SiCl}_4 + \text{CH}_4 + \text{H}_2$) وارد پیش‌فرم می‌شوند و طی واکنش شیمیایی، در خلل و فرج آن رسوب می‌کنند و ماتریس سرامیکی را تشکیل می‌دهند.

داغ، پایداری ماده در برابر خزش برای حفظ شکل، عملکرد و ایمنی سازه حیاتی است. کامپوزیت‌های زمینه‌سرامیکی در این زمینه عملکرد بسیار برتری نسبت به فلزات و حتی سوپرآلیاژها دارند. مکانیزم‌های مقاومت به خزش در CMC‌ها به چند عامل کلیدی بستگی دارد:

- ماتریس سرامیکی سخت (معمولاً SiC یا آلومینا) که تمایل کمی به لغزش شبکه‌ای دارد.
- الیاف تقویت‌کننده (مانند SiC فیبر یا C فیبر) که تنش را پخش کرده و از تمرکز آن جلوگیری می‌کنند.
- رابط بین الیاف و ماتریس که به توزیع بهتر تنش‌ها و جلوگیری از رشد ترک کمک می‌کند [۷۴].

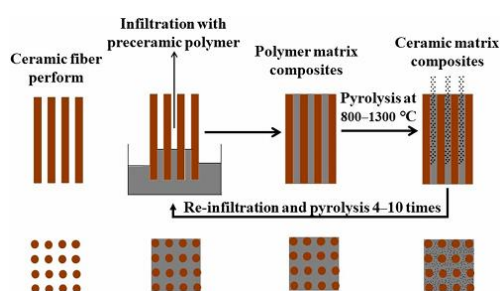
سوپرآلیاژهای نیکل در دمای $1100-1000^\circ\text{C}$ شروع به افت شدید خواص مکانیکی به دلیل خزش می‌کنند. در مقابل، CMC‌هایی مانند SiC/SiC یا C/SiC می‌توانند در دمای $1400-1200^\circ\text{C}$ تحت تنش پایدار، عملکرد مکانیکی خود را حفظ کنند [۷۵، ۷۶]. برای مثال، در آزمایش‌های انجام‌شده توسط NASA، نرخ خزش SiC/SiC در دمای 1315°C و تنش ۶۹ MPa حدود دو مرتبه کوچک‌تر از سوپرآلیاژهای معمول بود [۷۷].

در بسیاری از CMC‌ها، پایداری خزشی وابسته به ساختار میکروسکوپی، تخلخل، و طراحی بین‌لایه‌ها است. خزش معمولاً در فاز ماتریسی یا در مرز الیاف و ماتریس آغاز می‌شود، اما تا زمانی که اتصال بین الیاف و ماتریس پایدار بماند، ماده تغییر شکل نمی‌دهد [۷۸]. در برخی موارد، استفاده از پوشش‌های محافظ EBC نیز به حفظ خواص خزشی در محیط‌های اکسیدکننده و داغ کمک می‌کند [۷۹]. در طراحی

¹ Chemical vapor infiltration



شکل ۵ یک پیش‌ساخت از فیبر سرامیکی را نشان می‌دهد که در یک پلیمر پیش‌سرامیکی غوطه‌ور شده است و به مواد مرکب پلیمر-ماتریس سرامیکی (PMC) منجر می‌شود. از طریق تجزیه پیرولیتی به یک CMC تبدیل می‌شود، فرایندی متوالی که به منظور کاهش تخلخل CMC تکرار می‌شود [۸۶].



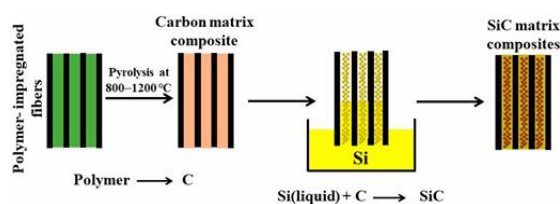
شکل ۵- سنتز CMC با استفاده از PIP [۸۵]

(ج) LSI^۲

پیش‌فرم حاوی کربن در معرض نفوذ سیلیکون مذاب قرار می‌گیرد که با واکنش شیمیایی، SiC تشکیل می‌دهد.

- مزایا: سرعت بالا، چگالی زیاد، تولید اقتصادی.
- معایب: وجود Si آزاد باقی‌مانده، کاهش مقاومت اکسیداسیون

[۸۷].



شکل ۶- سنتز CMCها با استفاده از LSI [۸۵]

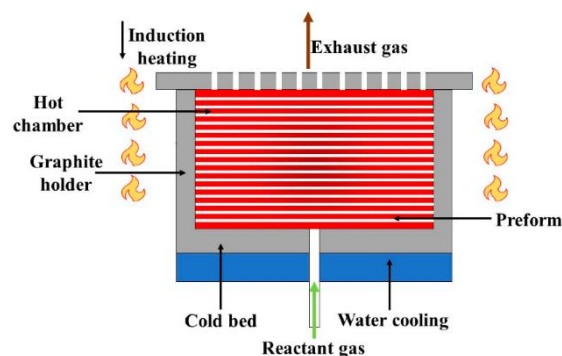
(د) CVD^۳

برای ایجاد لایه‌های پوشش نازک و کنترل‌شده بر روی الیاف

- مزایا: خواص یکنواخت، دمای کاری بالا

- معایب: فرآیند زمان‌بر (ده‌ها تا صدها ساعت)، باقی‌ماندن تخلخل زیاد ۱۵-۱۰٪ [۸۳، ۸۴].

شکل ۴ پیکربندی سامانه‌ای را نمایش می‌دهد که در آن یک پیش‌ساخت درون محفظه‌ای از جنس گرافیت قرار گرفته است. در این آرایش، بخش فوقانی محفظه در معرض گرمایش قرار دارد، در حالی که بخش تحتانی در دمای پایین‌تری نگهداری می‌شود. گاز واکنش‌پذیر از ناحیه پایینی وارد محفظه می‌گردد و در قسمت گرم‌تر بر سطح پیش‌ساخت رسوب می‌کند. در ادامه، گازهای حاصل از واکنش می‌توانند از بخش بالایی محفظه خارج شوند.



شکل ۴- سنتز CMC با استفاده از CVI [۸۵]

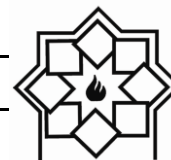
(ب) PIP^۱

پیش‌فرم با پلیمرهای سرامیک‌زا (مانند PCS) آغشته می‌شود و سپس در دمای بالا پیرولیز شده تا پلیمر به سرامیک تبدیل شود.

- مزایا: هزینه کم‌تر، مناسب برای قطعات پیچیده.

- معایب: جمع‌شدگی بالا، نیاز به سیکل‌های تکراری برای چگال‌سازی.

^۳ Chemical vapor deposition^۱ Polymer infiltration and pyrolysis^۲ Liquid silicon infiltration



یا سطح، از روش رسوب شیمیایی فاز بخار استفاده می‌شود. کاربرد اصلی آن در تولید interphase بین الیاف و ماتریس است [۸۹]. با تغییر پارامترهایی مانند فشار، دما، نرخ نفوذ یا سیکل‌های تکراری، خواص مکانیکی و حرارتی را می‌توان بهینه‌سازی کرد [۹۰].

ویژگی منحصر به فرد CMC ها این است که می‌توان با تغییر نوع و قطر الیاف، زاویه lay-up الیاف، نوع interphase (مانند BN یا PyC) و میزان و نوع پوشش نهایی EBC به خواص هدفمندی مثل افزایش مقاومت خزش، جذب انرژی شکست، یا افزایش پایداری شیمیایی دست یافت. این سطح از کنترل ساختاری، در فلزات یا سرامیک‌های سنتی قابل دسترسی نیست [۹۱، ۹۲].

۲-۸- پوشش‌های حفاظتی

کامپوزیت‌های زمینه‌سرامیکی، به‌ویژه آن‌هایی که بر پایه‌ی سیلیکون کاربید (SiC/SiC) ساخته می‌شوند، اگرچه خواص مکانیکی و حرارتی ممتازی دارند، اما در محیط‌های اکسند، بخار آب، و گازهای خورنده دما بالا در معرض تخریب سطحی هستند. برای مقابله با این چالش، از پوشش‌های حفاظتی به‌ویژه نوعی به نام پوشش‌های زیست‌مانع استفاده می‌شود که بخش جدایی‌ناپذیر از طراحی CMC در کاربردهای حرارتی پیشرفته‌اند. در دمای بالا (مثلاً ۱۵۰۰-۱۲۰۰°C) و در حضور بخار آب، اکسیداسیون SiC به تشکیل Si(OH)_4 و گازی منجر می‌شود که منجر به حفره‌دار شدن، تخلخل، و از بین رفتن تدریجی ماده می‌شود. این نوع تخریب در بخار بسیار مخرب‌تر از هوای خشک است. اگر سطح CMC بدون محافظ باقی بماند، کاهش شدید خواص مکانیکی و عمر خستگی حرارتی رخ خواهد داد [۹۳، ۹۴].

یک سامانه EBC معمولاً شامل لایه‌های زیر است:

- لایه چسبنده-برای اتصال بهتر پوشش به سطح کامپوزیت
- لایه میانی با تطابق حرارتی-برای جذب تنش‌های حرارتی
- لایه خارجی مقاوم به اکسیداسیون و خوردگی-معمولاً شامل سیلیکات‌های زمین نادر مانند $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ ، $\text{Yb}_2\text{Si}_2\text{O}_7$

یا Mullite [۹۵]

این چندلایه‌بودن، از ترک‌خوردگی یا پوسته‌شدگی جلوگیری کرده و تطابق انبساط حرارتی را با کامپوزیت اصلی فراهم می‌سازد. معمول‌ترین روش‌ها برای اعمال EBC شامل: پاشش پلاسمایی (APS) یا پاشش سوخت بالا (HVOF)، رسوب فاز بخار (CVD و PVD)، سل-ژل و اعمال دوغابی همراه با سینتر [۹۶]؛ هر روش با توجه به نوع کاربرد، شکل قطعه و دمای کاری انتخاب می‌شود. در آزمایش‌های شبیه‌سازی شده توربین، پوشش‌های چندلایه‌ی $\text{Yb}_2\text{Si}_2\text{O}_7/\text{Si}$ روی CMC های SiC/SiC موفق شدند بیش از ۱۰۰۰ ساعت در بخار داغ ۱۳۰۰°C پایدار بمانند، در حالی که نمونه‌های بدون پوشش در کم‌تر از ۲۰۰ ساعت دچار تخریب شدند [۹۷].

۳- مبانی تحلیل کمانش

۳-۱- تعریف کمانش و بار بحرانی

کمانش یک پدیده‌ی ناپایداری سازه‌ای است که در آن، عضو سازه‌ای تحت بار فشاری به‌صورت ناگهانی دچار تغییر شکل جانبی زیاد می‌شود. این پدیده بدون نیاز به تسلیم شدن ماده رخ می‌دهد و ممکن است منجر به شکست کلی سازه شود، حتی زمانی که تنش فشاری هنوز به مقاومت تسلیم ماده نرسیده است [۹۸]. در حالت کلاسیک، برای یک ستون باریک و کشیده با تکیه‌گاه‌های مناسب، بار بحرانی با استفاده



از فرمول اوپلر محاسبه می‌شود. فرمول اوپلر مبتنی بر فرض‌های ایده‌آل نظیر بارگذاری محوری، ماده‌ی همگن و خطی‌الاستیک و نبود نقص‌ها یا اثرات خزش و حرارت است، در حالی که در کاربردهای واقعی، به‌ویژه در سازه‌های سبک و مواد ناهمسانگرد مانند CMC ها، این فرضیات معمولاً برقرار نیستند. بنابراین برای تحلیل دقیق کمانش، باید از مدل‌های عددی غیرخطی یا ترمومکانیکی استفاده شود [۹۹]. برای سازه‌های نازک مانند صفحات و پوسته‌ها، کمانش ممکن است به‌صورت موضعی یا کلی رخ دهد. تحلیل این حالت‌ها معمولاً پیچیده‌تر بوده و نیاز به استفاده از روش‌های عددی مانند روش اجزای محدود دارد [۱۰۰]. در طراحی سازه‌ای، به‌ویژه در صنایع هوافضا، توجه به بار بحرانی برای جلوگیری از شکست ناپایدار و ناگهانی ضروری است. استفاده از ضریب ایمنی مناسب نسبت به بار بحرانی یکی از معیارهای کلیدی در طراحی سازه‌های تحت بار فشاری است [۱۰۱].

۳-۲- تفاوت کمانش کلی و موضعی

کمانش کلی زمانی رخ می‌دهد که کل عضو سازه‌ای (مثلاً یک تیر یا ستون) تحت بار فشاری دچار تغییر شکل کلی و خمشی می‌شود. این حالت معمولاً با فرکانس پایین، دامنه بزرگ، و مود خمشی یکپارچه مشخص می‌شود. نمونه کلاسیک: خم شدن یک ستون نازک تحت بار فشاری محوری (کمانش اوپلری) [۱۰۲]. کمانش موضعی زمانی رخ می‌دهد که بخشی محدود از سازه—مانند جداره‌ی یک تیر جعبه‌ای، بال تیر، یا بخش نازک پوسته‌ی پانل—تحت تنش فشاری دچار ناپایداری شود. این حالت معمولاً با فرکانس بالاتر، طول موج کوتاه‌تر،

و مود موضعی مشخص می‌شود؛ نمونه: چین خوردگی موضعی جداره نازک یک تیر مرکب یا پوسته استوانه‌ای تحت فشار [۱۰۳]. در بسیاری از سازه‌های سبک و کامپوزیتی، مانند پانل‌های هوافضا، تیرهای جعبه‌ای، پوسته‌های استوانه‌ای—دو نوع کمانش می‌توانند به‌صورت هم‌زمان یا متوالی اتفاق بیفتند. این تعامل می‌تواند به رفتار غیرخطی پیچیده و شکست زودرس منجر شود. برای مثال، کمانش موضعی ممکن است به‌عنوان مکانیزم شروع‌کننده کمانش کلی یا پسا-کمانشی عمل کند [۱۰۴]. در مواد ناهمسانگرد مانند CMC ها، کمانش موضعی نقش برجسته‌تری دارد، زیرا: تفاوت‌های شدید خواص در راستاهای مختلف (آنایزوتروپی)، حساسیت به نقص‌های سطحی و میکروتکرک‌ها، Lay-up غیریکسان و اثرات مرزی شدید؛ در نتیجه، تحلیل دقیق هر دو نوع کمانش (و تعامل آن‌ها) در طراحی CMC های ساختاری الزامی است [۱۰۵، ۱۰۶].

۳-۳- روش‌های عددی و تحلیلی

تحلیل کمانش به‌منظور پیش‌بینی بار بحرانی، نوع مود ناپایداری، و مسیر پسا-کمانش یک سازه، یکی از مهم‌ترین بخش‌های طراحی مهندسی است. دو رویکرد اصلی برای تحلیل کمانش عبارتند از: روش‌های تحلیلی و روش‌های عددی که انتخاب بین این دو به پیچیدگی هندسه، شرایط مرزی، جنس ماده و دقت مورد نیاز بستگی دارد.

در روش‌های تحلیلی، با استفاده از معادلات دیفرانسیل حاکم بر تعادل الاستیک، کمانش سازه حل می‌شود. این روش‌ها معمولاً برای سیستم‌های ساده و دارای تقارن هندسی کاربرد دارند.

۳-۳-۱- روش انرژی^۱

^۱ Energy method



تیرهای تقویت‌شده، پوسته‌های منشوری و صفحات جعبه‌ای کاربرد دارد [۱۱۱، ۱۱۲].

رویکردهای تحلیلی، عددی و تجربی مختلفی برای بررسی رفتار کمانش اجزای سازه‌ای به کار گرفته شده‌اند. مروری مقایسه‌ای بر رایج‌ترین روش‌های تحلیل کمانش در جدول ۲ ارائه شده است. در حالی که راه‌حل‌های تحلیلی کلاسیک، بینش فیزیکی ارزشمندی ارائه می‌دهند، رویکردهای مبتنی بر المان محدود به دلیل توانایی‌شان در در نظر گرفتن ناهمسانگردی مواد، هندسه‌های پیچیده و خواص مواد وابسته به دما، پرکاربردترین تکنیک‌ها برای سازه‌های CMC هستند [۱۱۳-۱۱۵].

۴- تحلیل کمانش در سازه‌های ساخته‌شده از CMC

تحلیل کمانش در سازه‌های ساخته‌شده از کامپوزیت‌های زمینه‌سرامیکی، به دلیل خواص حرارتی و مکانیکی منحصر به فرد این مواد، چالش‌ها و ملاحظات خاصی دارد.

روش انرژی، یکی از روش‌های کلاسیک برای تحلیل پایداری سازه‌ها است که بر پایه اصل کار مجازی یا اصل همیلتون بنا شده است. در این روش، تعادل پایداری از مقایسه بین انرژی کرنشی ذخیره‌شده در سازه و انرژی کار انجام‌شده توسط بارهای خارجی حاصل می‌شود [۱۰۷، ۱۰۸].

۳-۳-۲- روش اجزای محدود^۱

روش اجزای محدود یکی از مهم‌ترین و پرکاربردترین ابزارهای عددی در تحلیل کمانش است. در این روش، سازه به اجزای کوچک تقسیم شده و سپس معادلات تعادل به صورت ماتریسی حل می‌شوند. FEM برای تحلیل کمانش خطی، غیرخطی، موضعی و کلی در سازه‌های مرکب و دما-وابسته بسیار مناسب است [۱۰۹، ۱۱۰].

۳-۳-۳- روش نوار محدود^۲

در این روش نیمه‌تحلیلی، سازه به نوارهای باریک تقسیم می‌شود و در راستای طولی از توابع سری (مانند سینوس یا کسینوس) برای تقریب خیز استفاده می‌شود. این روش برای

جدول ۲- مقایسه روش‌های تحلیلی، عددی و تجربی برای بررسی کمانش

روش	کمانش خطی	کمانش غیرخطی	اثرات حرارتی	مزایا	محدودیت‌ها	مرجع
روش انرژی	بله	خیر	محدود	بینش ساده و تحلیلی	محدود به هندسه‌های ساده	[۱۱۳]
راه‌حل‌های تحلیلی کلاسیک	بله	خیر	خیر	عبارات بسته	فرضیات ایده‌آل	[۱۱۴]
روش المان محدود (FEM)	بله	بله	بله	قادر به مدیریت هندسه پیچیده و ناهمسانگردی مواد	هزینه محاسباتی	[۱۱۵، ۱۱۶]
روش نوار محدود (FSM)	بله	محدود	محدود	کارآمد برای صفحات و پوسته‌ها	شرایط مرزی محدود	[۱۱۷]
آزمایش تجربی	بله	بله	بله	رفتار واقع‌بینانه	هزینه بالا، مطالعات پارامتری محدود	[۱۱۸]

² Finite Strip Method-FSM

¹ FEM



متعددی بوده است [۱۲۸، ۱۲۹]. در ستون‌های تقویت‌شده با فیبر سیلیکون کاربید (SiC)، بار بحرانی کمانش می‌تواند با افزایش دمای کاری به طرز محسوسی کاهش یابد [۱۳۰].

۴-۲- تأثیر ناهمسانگردی و لایه‌چینی در رفتار کمانشی

در ساختارهای کامپوزیتی، نحوه قرارگیری لایه‌ها و ویژگی‌های ناهمسانگرد آن‌ها اثر قابل توجهی بر پایداری کمانشی دارد. CMC‌ها معمولاً به صورت چندلایه با جهت‌گیری‌های متفاوت فیبر طراحی می‌شوند. آرایش زاویه‌ای لایه‌ها به طور مستقیم بر مقدار بار کمانش و نوع مود کمانشی اثر می‌گذارد [۱۳۱]. استفاده از lay-up‌های متقارن موجب پایداری بهتر در برابر کمانش می‌شود، به‌ویژه در صفحات مسطح [۱۳۲]. مدل‌سازی‌های عددی مانند تحلیل المان محدود نشان داده‌اند که تغییر ناچیز در زاویه‌گذاری فیبرها می‌تواند منجر به تغییر محسوس در بار بحرانی شود [۱۳۳]. پاسخ کمانش سازه‌های CMC به شدت تحت تأثیر چندین پارامتر متقابل قرار دارد. همان‌طور که در جدول ۳ خلاصه شده است، دمای بالا عموماً منجر به کاهش سختی الاستیک و بار کمانش بحرانی می‌شود، در حالی که ناهمسانگردی مواد و پیکربندی لایه‌گذاری به طور قابل توجهی بر محدودیت‌های پایداری و شکل‌های حالت کمانش تأثیر می‌گذارد. علاوه بر این، نقص‌های هندسی اولیه و نقص‌های ریزساختاری ممکن است ظرفیت حمل بار اجزای CMC را بیش‌تر کاهش دهند [۱۳۴، ۱۳۶].

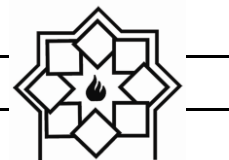
۴-۳- نقش نقص‌های اولیه و ترک‌ها در کاهش بار کمانشی

وجود ترک‌های اولیه، نقص‌های ساختاری، یا تخلخل در ساختار CMC‌ها می‌تواند باعث کاهش چشمگیر در ظرفیت باربری کمانش شود.

CMC‌ها به دلیل تحمل دمای بالا، مقاومت به شوک حرارتی، و چقرمگی نسبتاً بالا نسبت به سرامیک‌های معمولی، گزینه‌ای مناسب برای کاربرد در صنایع هوایی، فضایی و انرژی هستند [۱۱۹]. CMC‌ها ترکیبی از زمینه سرامیکی و تقویت‌کننده‌های فیبری (مانند SiC/SiC یا C/SiC) هستند. ناهمگنی، نایزوتروپی و وجود میکروتُرک‌ها در این مواد، رفتار کمانشی آن‌ها را نسبت به فلزات یا پلیمرها پیچیده‌تر می‌کند [۱۲۰، ۱۲۱]. همچنین، اندرکنش میان میدان‌های حرارتی و مکانیکی در این مواد منجر به بروز کمانش حرارتی می‌شود [۱۲۲، ۱۲۳]. در دماهای بالا، تغییر خواص ترمومکانیکی CMC‌ها از جمله کاهش مدول یانگ و افزایش انبساط حرارتی سبب کاهش بار بحرانی می‌شود. تحقیقات مختلف نشان داده‌اند که بار بحرانی تحت شرایط حرارتی می‌تواند به شدت افت کند، به‌ویژه زمانی که سازه به صورت نایزوتروپ ساخته شده باشد [۱۲۴-۱۲۶].

۴-۱- بررسی رفتار کمانشی صفحات، پوسته‌ها و ستون‌ها

کامپوزیت‌های زمینه سرامیکی به دلیل استحکام بالا، مقاومت در برابر دمای زیاد و خوردگی، گزینه مناسبی برای سازه‌های سبک با بارگذاری فشاری هستند. با این حال، رفتار کمانشی این مواد به شدت تحت تأثیر خواص غیرخطی و ترد آن‌هاست. تحلیل دقیق کمانش صفحات و پوسته‌های CMC به بررسی شرایط مرزی، هندسه، ضخامت و نوع تقویت‌کننده بستگی دارد. صفحات CMC معمولاً رفتار کمانشی ترد دارند و تغییر شکل پلاستیکی پیش از کمانش بسیار کم است [۱۲۷]. کمانش در پوسته‌های استوانه‌ای تقویت‌شده با CMC تحت فشار محوری یا حرارتی موضوع مطالعات تجربی و عددی



جدول ۳- تأثیر پارامترهای کلیدی بر رفتار کمانش سازه‌های CMC

پارامتر	تأثیر بر رفتار کمانش	مرجع
افزایش دما	کاهش مدول الاستیک و بار کمانش بحرانی	[۱۳۴، ۱۳۵]
ناهمسانگردی مواد	تغییر شکل‌های مد کمانش و بار بحرانی	[۱۳۶]
پیکربندی چیدمان	تغییر مقاومت در برابر کمانش	[۱۱۶، ۱۳۷]
نقص‌های اولیه	کمانش زودرس	[۱۳۸]
ترک‌ها و تخلخل	کاهش قابل توجه ظرفیت باربری	[۵۰]

ترک یا آسیب پیش‌رس [۱۴۶]. مقایسه نتایج عددی و تجربی روی صفحات SiC/SiC نشان داده است که در صورت در نظر گرفتن خواص دمایی و وابسته به زمان، خطای پیش‌بینی بار بحرانی کمانش کم‌تر از ۱۰٪ است [۱۴۷]. نتایج آزمایشگاهی کمانش ستون‌های CMC تحت بارگذاری محوری در دمای بالا نشان دادند که تحلیل‌های متعارف خطی تفاوت معناداری با پاسخ واقعی دارند [۱۴۸].

۵-۲- بررسی تأثیر دما، بارگذاری محوری و شرایط مرزی

یکی از مهم‌ترین چالش‌ها در تحلیل کمانش سازه‌های CMC، اثر هم‌زمان عوامل محیطی و شرایط مرزی است. رفتار مواد سرامیکی در دماهای بالا به شدت تغییر می‌کند و منجر به افت مدول، تنش‌های حرارتی و تغییر در مودهای کمانشی می‌شود. افزایش دما موجب کاهش مدول الاستیسیته و سختی CMC شده و بار بحرانی کمانش را به طور چشمگیری کاهش می‌دهد. این پدیده در دماهای بالاتر از ۱۰۰۰°C بیش‌تر مشهود است [۱۴۹، ۱۵۰]. شرایط مرزی (مفصل ساده، گیردار، تکیه‌گاه الاستیک) تأثیر قابل توجهی در مودهای کمانش و مقدار بار بحرانی دارند. مطالعات نشان داده‌اند که در شرایط گیردار، ظرفیت کمانش افزایش می‌یابد [۱۵۱]. بارگذاری محوری یکنواخت، نسبت به بارگذاری‌های غیریکنواخت یا

ترک‌های مویی یا فصل مشترک ضعیف در کامپوزیت‌ها می‌تواند مسیر کمانش و پس‌کمانش را تغییر دهد. تحلیل پایداری دینامیکی با در نظر گرفتن رشد ترک یکی از زمینه‌های فعال در پژوهش‌های جدید است [۱۳۹-۱۴۱]. حتی ترک‌های ریز ناشی از فرایند تولید یا اکسیداسیون سطحی می‌توانند به عنوان نقاط آغاز کمانش زودرس عمل کنند [۱۴۲]. تحقیقات تجربی نشان داده‌اند که در نمونه‌هایی با تخلخل بالاتر از ۵٪، بار بحرانی تا ۳۰٪ کاهش می‌یابد [۱۴۳]. مدل‌های آسیب‌پذیری پیش‌رونده در تحلیل المان محدود برای در نظر گرفتن اثر این نوع نقص‌ها توسعه یافته‌اند [۱۴۴، ۱۴۵].

۵- مروری بر مطالعات تجربی و عددی

۵-۱- مقایسه نتایج آزمایشگاهی با تحلیل‌های عددی

تحلیل عددی با روش‌هایی نظیر المان محدود (FEM)، تحلیل غیرخطی، و روش‌های لایه‌ای به صورت گسترده برای پیش‌بینی رفتار کمانشی سازه‌های CMC مورد استفاده قرار گرفته است. با این حال، دقت این مدل‌ها نیازمند اعتبارسنجی از طریق نتایج آزمایشگاهی است. بسیاری از مطالعات نشان داده‌اند که مدل‌های غیرخطی چندمقیاسی قادرند با دقت بالایی رفتار کمانشی CMC را شبیه‌سازی کنند، به‌ویژه در حالت وجود



ترکیبی (محوری-جانبی)، پاسخ متفاوتی در سازه‌های CMC ایجاد می‌کند. در بارگذاری ترکیبی احتمال وقوع کمناش موضعی در نواحی خاص بیش‌تر است [۱۵۲].

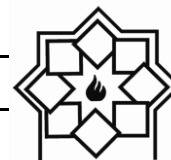
در بیش‌تر مدل‌های عددی اخیر، از رویکردهای مکانیک آسیب پیش‌رونده برای مدل‌سازی اثر تخریب حرارتی و مکانیکی در شرایط دمای بالا استفاده شده است. آزمایش‌های تجربی در دماهای بالا نیازمند تجهیزات خاص مانند کوره‌های با کنترل بار دقیق، دوربین‌های مادون قرمز برای ثبت مودهای کمناشی و سنسورهای جابه‌جایی مقاوم در برابر گرما هستند [۱۵۳].

بررسی‌های عددی و تجربی نمونه گزارش‌شده در مقالات در مورد رفتار کمناش سازه‌های کامپوزیت زمینه سرامیکی در جدول ۴ خلاصه شده است. می‌توان مشاهده کرد که ناهمسانگردی، دما و تنش‌های حرارتی، عوامل غالب حاکم بر بار کمناش بحرانی سازه‌های CMC هستند. اکثر مطالعات به‌طور مداوم کاهش قابل توجه مقاومت کمناش در دماهای بالا به دلیل تخریب سختی را گزارش می‌کنند که ضرورت گنجاندن خواص مواد وابسته به دما در تحلیل‌های پایداری را برجسته می‌کند [۱۳۶، ۱۳۴].

مطالعات پیشین در زمینه کمناش سازه‌های ساخته‌شده از CMC عمدتاً بر معرفی خواص ترمومکانیکی این مواد و کاربردهای آن‌ها در صنایع هوافضا و انرژی متمرکز بوده‌اند. با وجود ارزشمند بودن این تحقیقات، بررسی انتقادی نشان می‌دهد که بسیاری از آن‌ها رویکردی توصیفی داشته و کم‌تر به مقایسه‌ی نظام‌مند روش‌های تحلیل یا ارزیابی محدودیت‌های عملی پرداخته‌اند. روش‌های کلاسیک تحلیلی مانند معادله اولر یا روش انرژی، اگرچه پایه‌ی نظری محکمی دارند، اما در مطالعات اخیر مشخص شده که دقت آن‌ها در سازه‌های ناهمسانگرد یا دارای نقص ساختاری به شدت کاهش می‌یابد. مقالاتی که صرفاً به این روش‌ها اتکا کرده‌اند، نتوانسته‌اند رفتار واقعی سازه‌های CMC را در شرایط عملیاتی بازنمایی کنند. روش FEM به‌عنوان پرکاربردترین ابزار عددی، در بسیاری از پژوهش‌ها برای مدل‌سازی کمناش صفحات و پوسته‌های CMC استفاده شده است. با این حال، نقد اصلی بر این رویکرد آن است که نتایج آن به شدت وابسته به کیفیت مش‌بندی و مدل‌سازی غیرخطی هستند.

جدول ۴- خلاصه‌ای از مطالعات انجام‌شده در مورد رفتار کمناش سازه‌های CMC

مرجع	نوع سازه	سیستم مواد	روش	پارامترهای در نظر گرفته‌شده	یافته‌های اصلی
[۱۳۴]	صفحه	کامپوزیت لمینت شده	FEM	دما، زمان آماده سازی	بار کمناش بحرانی به دلیل تخریب سختی، با افزایش دما به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد.
[۱۳۵]	صفحه	کامپوزیت	FEM/تحلیلی	بارگذاری حرارتی	تنش‌های حرارتی به شدت بر پاسخ کمناش تأثیر می‌گذارند.
[۱۳۶]	صفحه	SiC/SiC CMC	FEM	ناهمسانگردی، دما	ناهمسانگردی مواد نقش غالب را در رفتار کمناش حرارتی ایفا می‌کند.
[۱۳۷]	صفحه	کامپوزیت لمینت شده	FEM	لایه‌گذاری، شرایط مرزی	طراحی مناسب لایه‌گذاری، مقاومت در برابر کمناش را بهبود می‌بخشد.
[۱۱۵]	صفحه/پوسته	کامپوزیت‌های پیش‌رفته	نقد و بررسی	اثرات ترمومکانیکی	مدل‌سازی غیرخطی ترمومکانیکی ضروری است.



برخی مطالعات بدون اعتبارسنجی تجربی، نتایج FEM را گزارش کرده‌اند که قابلیت تعمیم آن‌ها را محدود می‌کند. روش FSM در مقایسه با FEM محاسبات سبک‌تر و سریع‌تر ارائه می‌دهد، اما در مطالعات گذشته کم‌تر به نقاط ضعف آن در تحلیل سازه‌های پیچیده و شرایط مرزی غیرمعمول پرداخته شده است. این خلأ باعث شده که FSM بیش‌تر در مسائل ساده به کار رود و در حوزه‌ی CMC‌ها کم‌تر توسعه یابد.

از نظر محتوایی، بخش قابل توجهی از مقالات مروری موجود تنها به بیان کلی چالش‌ها مانند ناهمسانگردی، وابستگی خواص به دما، یا وجود ترک‌ها بسنده کرده‌اند، بدون آنکه مقایسه‌ای انتقادی میان راهکارهای مختلف برای رفع این مشکلات ارائه دهند. برای مثال، در حالی که برخی پژوهش‌ها استفاده از lay-up چندمحوره را به عنوان راهکار کاهش حساسیت به کمانش پیشنهاد کرده‌اند، مطالعات دیگر نشان داده‌اند که این رویکرد می‌تواند منجر به افزایش پیچیدگی در تحلیل غیرخطی شود. چنین تناقض‌هایی کم‌تر در مقالات مروری پیشین برجسته شده‌اند. در مجموع، مرور انتقادی ادبیات نشان می‌دهد که نوآوری محدود در روش‌های تحلیلی موجود، نیاز به توسعه مدل‌های چندمقیاسی و ترکیبی را برجسته می‌کند.

۶- کاربردهای صنعتی و چالش‌ها

۶-۱- استفاده در صنایع هوافضا، توربین‌ها، و سازه‌های سبک

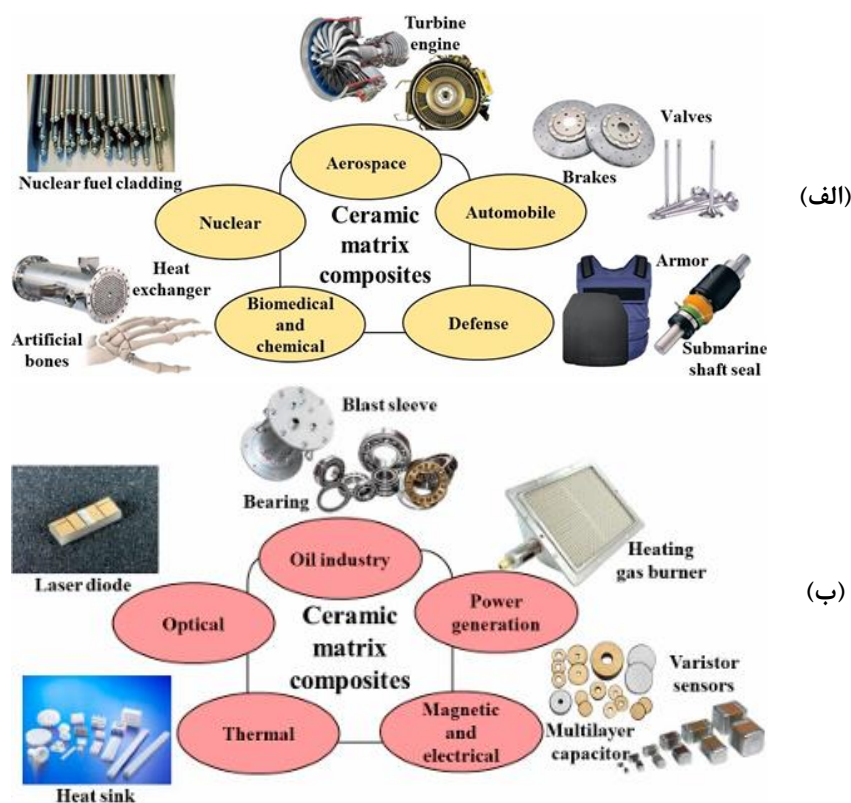
کامپوزیت‌های زمینه سرامیکی به دلیل مقاومت حرارتی بالا، استحکام مکانیکی مناسب در دماهای بالا و سبکی، در سال‌های اخیر توجه زیادی در صنایع پیشرفته به خود جلب کرده‌اند. از کاربردهای کلیدی آن‌ها، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- صنایع هوافضا: استفاده از CMC در نازل‌های موتور جت، اجزای داخلی توربین، صفحات حرارتی و قطعات ساختاری سبک‌وزن، باعث کاهش وزن کلی هواپیما و افزایش بهره‌وری سوخت می‌شود [۱۵۴، ۱۵۵]. به‌ویژه C/SiC و SiC/SiC در ساخت پره‌های توربین و اگزوزها کاربرد دارند [۱۵۶].
- توربین‌های گازی و بخار: در بخش انرژی، این مواد در پره‌های داغ توربین‌ها و پوشش‌های داخلی استفاده می‌شوند که در معرض دمای بالا و محیط‌های اکسیدکننده هستند [۱۵۷، ۱۵۸].
- سازه‌های سبک: در صنایع حمل‌ونقل پیشرفته (مانند خودروهای مسابقه‌ای یا هواپیماهای بدون سرنشین)، CMC‌ها به دلیل نسبت استحکام به وزن بالا و مقاومت خزشی مناسب، جایگزین خوبی برای آلیاژهای فلزی شده‌اند [۱۵۹، ۱۶۰]. همچنین در سامانه‌های دفاعی (مانند سپرهای حرارتی فضاپیما یا ساختارهای رادارگریز)، به دلیل عملکرد عالی در شرایط تنش حرارتی شدید از این مواد بهره گرفته می‌شود [۱۶۱]. در شکل ۷ نمونه‌هایی از کاربردهای مختلف CMC‌ها نشان داده می‌شود.

۶-۲- چالش‌های طراحی و تحلیل دقیق

علی‌رغم مزایای بسیار، کاربرد گسترده CMC‌ها با چالش‌هایی همراه است:

- رفتار غیرخطی پیچیده: رفتار کمانش این مواد تحت بارگذاری ترکیبی، به دلیل ناهمسانگردی، تخلخل و ترک‌خوردگی درون ماده، به سختی قابل پیش‌بینی است [۱۷۸، ۱۷۹]. مدل‌سازی دقیق آن‌ها نیازمند استفاده از روش‌های پیشرفته مانند تحلیل اجزاء محدود غیرخطی و مدل‌های مکانیکی چندمقیاسی است [۱۸۰].



شکل ۷- نمونه‌هایی از کاربردهای مختلف CMCها (الف صنعتی ب) مهندسی [۱۶۲-۱۷۷]

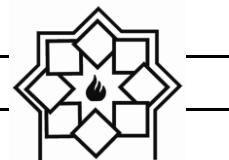
- کمبود داده‌های تجربی: یکی از بزرگ‌ترین چالش‌ها برای تحلیل دقیق کمانش در CMCها، کمبود داده‌های تجربی معتبر در شرایط مختلف محیطی و مرزی است [۱۸۶].

۷- نتیجه‌گیری

تحلیل جامع رفتار کمانش سازه‌های ساخته‌شده از کامپوزیت‌های زمینه سرامیکی نشان داد که پاسخ کمانش این مواد شدیداً متأثر از شرایط محیطی و پارامترهای ساختاری است. یافته‌های اصلی این مرور به شرح زیر خلاصه می‌شوند:

۱. تأثیر وابستگی عملکرد به دما و ساختار: نتایج تحلیل‌ها به وضوح نشان دادند که خواص ترمومکانیکی CMCها، به‌ویژه مدول الاستیسیته، تحت تأثیر دمای محیط قرار گرفته و کاهش می‌یابد. این تغییر پارامترها مستقیماً بر

- شکنندگی بالا: ذات سرامیکی مواد زمینه، آن‌ها را در برابر شکست ترد و ناگهانی حساس می‌کند، به‌ویژه تحت کمانش فشاری یا ضربه [۱۸۱].
- اثر دما و اکسیداسیون: در دماهای بالا، واکنش‌های اکسیداسیون می‌توانند خواص مکانیکی را به شدت تضعیف کنند. بنابراین طراحی CMCها نیازمند لحاظ کردن اثر دما، محیط اکسیدکننده و نرخ بارگذاری است [۱۸۲].
- چالش در تحلیل کمانش: روش‌های مرسوم تحلیل کمانش خطی برای CMCها به دلیل رفتار وابسته به دما، آسیب‌پذیری در برابر رطوبت و حرارت، و خواص وابسته به فرآیند ساخت، دقت کافی ندارند [۱۸۳، ۱۸۴]. توسعه روش‌های تحلیل تجربی-عددی ترکیبی به‌منظور افزایش دقت پیشنهاد شده است [۱۸۵].



- Strong and Lightweight Material Solution. Res. Rev. J. Mater. Sci. 2022, 10, 1–2.
- [2]. Chawla, K. K. Ceramic Matrix Composites. In Composite Materials; Springer: New York, NY, USA, 2012; pp. 249–292.
- [3]. Shvydyuk, K. O.; Nunes-Pereira, J.; Rodrigues, F. F.; Silva, A. P. Review of Ceramic Composites in Aeronautics and Aerospace: A Multifunctional Approach for TPS, TBC and DBD Applications. Ceramics 2023, 6, 195–230.
- [4]. Ceramic-Matrix Composites Heat Up. On Composite World. 2013. Available online: <https://www.compositesworld.com/articles/ceramic-matrix-composites-heat-up> (accessed on 12 June 2023).
- [5]. Sher, D. Novel process by HRL Laboratories creates 3D printed ceramic matrix composites. Voxel Matters, 2020. Available online: [https://www.voxelmatters.com/novel-process-by-hrl-laboratories-creates-3d-printed-ceramic-matrix-composites/#:~:text=Ceramic%20matrix%20composites%20\(CMCs\)%20are,be%20considered%20a%20ceramic%20material](https://www.voxelmatters.com/novel-process-by-hrl-laboratories-creates-3d-printed-ceramic-matrix-composites/#:~:text=Ceramic%20matrix%20composites%20(CMCs)%20are,be%20considered%20a%20ceramic%20material) (accessed on 30 June 2023).
- [6]. <https://www.cem-wave.eu/blog/what-are-applications-ceramic-matrix-composite-cmc-materials> (accessed on 12 June 2023).
- [7]. Lightweight, Ultra-High-Temperature, CMC-Lined Carbon/Carbon Structures. On Tech Briefs. 2011. Available online: <https://www.techbriefs.com/component/content/article/tb/pub/briefs/materials/9150> (accessed on 12 June 2023).
- [8]. Stojanovic, B.; Glisovic, J. Application of Ceramic Matrix Composite in Automotive Industry. Ref. Modul. Mater. Sci. Mater. Eng. 2021, 2, 275–292.
- [9]. Fan, J.; Njuguna, J. An introduction to lightweight composite materials and their use in transport structures. Lightweight Compos. Struct. Transp. 2016, 3–34.
- [10]. Eyring, G.; Bull, T.E. US Congress 1988 Office of Technology Assessment (1988). Polymer Matrix Composites, Advanced Materials by Design, OTA-E-351, Library of Congress Catalogue Card No. 87-619860, June 1988; pp. 71–95. Available online:

بار بحرانی کمانش (چه موضعی و چه کلی) در انواع سازه‌ها (صفحات، پوسته‌ها، ستون‌ها) تأثیرگذار است. همچنین، پارامترهای مربوط به ساختار لایه‌ای (مانند ناهمسانگردی و آرایش لایه‌ها)، عامل تعیین‌کننده در تعیین الگوهای کمانش و استحکام ویژه ماده در برابر بارگذاری هستند.

۲. ضرورت رویکردهای تحلیلی پیشرفته: مشخص شد که مدل‌سازی دقیق رفتار کمانش، به‌ویژه در مواجهه با نقص‌های ساختاری (مانند وجود ترک‌ها یا تخلخل‌های ناشی از فرآیندهای ساخت)، نیازمند به‌کارگیری روش‌های پیشرفته عددی و تحلیلی است. مدل‌های سنتی در پیش‌بینی دقیق رفتار این مواد ناکارآمد بوده و استفاده از روش‌های اجزاء محدود غیرخطی و مدل‌سازی‌هایی که مکانیزم‌های آسیب تدریجی را در بر بگیرند، برای دستیابی به نتایج قابل اعتماد ضروری است.

۳. چالش‌های عملیاتی و مسیر آینده: چالش‌های اساسی در طراحی سازه‌های CMC برای کاربردهای پیشرفته (هوافضا، توربین‌های گازی) حول محور دوام بلندمدت در محیط‌های سخت می‌چرخد. دوام این مواد به شدت وابسته به کنترل پدیده‌هایی نظیر خزش در دماهای بالا و همچنین مقاومت در برابر اکسیداسیون و خوردگی است. توسعه پوشش‌های محافظ کارآمد برای مقابله با این اثرات محیطی، به همراه توسعه مدل‌سازی غیرخطی چندمقیاسی و اعتبارسنجی تجربی در شرایط واقعی عملیاتی، مسیری اجتناب‌ناپذیر برای اطمینان از طراحی دقیق و عملکرد مطمئن‌تر این مواد پیشرفته خواهد بود.

مراجع

- [1]. Francis, J. Ceramic Matrix Composites: A



- Metal Structures. McGraw-Hill.
- [22]. Zienkiewicz, O. C., & Taylor, R. L. (2005). *The Finite Element Method for Solid and Structural Mechanics*. Elsevier.
- [23]. Zhang, Y. Y., & Tong, L. (2008). Buckling of composite plates and shells. *Composite Structures*, 82(3), 331–340.
- [24]. Przemieniecki, J. S. (1985). *Theory of Matrix Structural Analysis*. Dover Publications.
- [25]. Shrivastava, A., et al. (2024). *Ceramic Matrix Composites: Classifications, Manufacturing, Properties, and Applications*. Ceramics.
- [26]. Temperature ceramic matrix composite. https://en.wikipedia.org/wiki/Ultra-high_temperature_ceramic_matrix_composite.
- [27]. Zivic, F. et al. (2021). *Ceramic Matrix Composites: Classifications, Manufacturing, Properties and Applications*, p. 4.
- [28]. J. W. Fergus, “Ceramic and composite materials for high temperature energy conversion”, *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 32, no. 4, pp. 525–540, 2012.
- [29]. P. F. Becher et al., “Toughening of ceramics and ceramic composites”, *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 74, no. 2, pp. 255–269, 1991.
- [30]. S. W. Sloan, “Creep and oxidation behavior of SiC/SiC CMCs under high-temperature exposure”, *Journal of Materials Science*, vol. 50, no. 3, pp. 1051–1063, 2015.
- [31]. C. G. Levi, “Emerging materials and processes for thermal barrier systems”, *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, vol. 8, no. 1, pp. 77–91, 2004.
- [32]. A. G. Evans and D. B. Marshall, “The mechanical behavior of ceramic matrix composites”, *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 80, no. 10, pp. 2061–2093, 1997.
- [33]. J. Lamon, “Mechanics of CMCs: From the microstructure to the structural scale”, *Composites Science and Technology*, vol. 65, no. 2, pp. 213–230, 2005.
- [34]. H. Schneider and M. Scheffler, *Ceramic Matrix Composites: Materials, Modeling and Technology*, Wiley-VCH, 2008.
- <https://www.princeton.edu/~ota/disk2/1988/8801/880106.PDF> (accessed on 12 June 2023).
- [11]. Luthra, K.L. *Ceramic Matrix Composites (CMCs) for Gas Turbine Applications*. GE Corporate Research & Development Schenectady, NY 1230. Available online: <https://www.electrochem.org/dl/ma/201/pdfs/1108.pdf> (accessed on 27 August 2023).
- [12]. Karadimas, G.; Salonitis, K. *Ceramic Matrix Composites for Aero Engine Applications —A Review*. *Appl. Sci.* 2023, 13, 3017.
- [13]. Jefferson, G.; Keller, K.A.; Hay, R.S.; Kerans, R.J. *Oxide/Oxide Composites with Fiber Coatings*. *Ceram. Matrix Compos.* 2008, 187–204.
- [14]. Kaya, C.; Kaya, F.; Butler, E.; Boccaccini, A.; Chawla, K. Development and characterisation of high-density oxide fibre-reinforced oxide ceramic matrix composites with improved mechanical properties. *J. Eur. Ceram. Soc.* 2009, 29, 1631–1639.
- [15]. Chawla, K.K. *Ceramic Matrix Composite Materials Interface*. In *Ceramic Matrix Composites*, 2nd ed.; Springer: New York, NY, USA, 2003; Volume 12, pp. 139–167.
- [16]. Karadimas, G.; Salonitis, K.; Georgarakis, K. *Oxide Ceramic Matrix Composite Materials for Aero-Engine Applications: A Literature Review*. *Adv. Transdiscipl. Eng.* 2021, 15, 153–158.
- [17]. Jacobson, N.S.; Opila, E.J. *Oxidation and Corrosion of Non-oxide Ceramics*. *Ref. Modul. Mater. Sci. Mater. Eng.* 2016.
- [18]. Dhanasekar, S.; Ganesan, A.T.; Rani, T.L.; Vinjamuri, V.K.; Rao, M.N.; Shankar, E.; Dharamvir; Kumar, P.S.; Golie, W.M. *A Comprehensive Study of Ceramic Matrix Composites for Space Applications*. *Adv. Mater. Sci. Eng.* 2022, 2022, 6160591.
- [19]. Timoshenko, S., & Gere, J. M. (1961). *Theory of Elastic Stability*. McGraw-Hill.
- [20]. Bazant, Z. P., & Cedolin, L. (2010). *Stability of Structures: Elastic, Inelastic, Fracture, and Damage Theories*. World Scientific.
- [21]. Bleich, F. (1952). *Buckling Strength of*



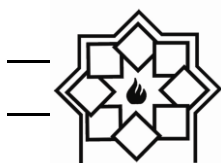
- of advanced CMCs”, 2005.
- [46]. Bocanegra-Bernal, M. H., “Hot structural applications of ceramics and ceramic matrix composites”, *Journal of Materials Science*, vol. 39, pp. 6399–6420, 2004.
- [47]. Cramer, C. A. et al., “CMC applications in gas turbine engines”, *Ceramic Engineering and Science Proceedings*, vol. 35, no. 5, pp. 37–45, 2014.
- [48]. Petrovic, J. J., “Thermal shock resistance of advanced ceramics”, *Materials Science and Engineering A*, vol. 105, pp. 193–199, 1988.
- [49]. Rida Zhao, Shengyang Pang, Chenglong Hu, Jian Li, Bin Liang, Sufang Tang, Hui-Ming Cheng. 2023. “Fabrication of C/SiC Composites by Siliconizing Carbon Fiber Reinforced Nanoporous Carbon Matrix Preforms and Their Properties”. *Journal of the European Ceramic Society* 43(2): 273–282. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc. 2022.10.028.
- [50]. Naslain, R. (2004). Design, preparation and properties of non-oxide ceramic matrix composites for application in engines and nuclear reactors: an overview. *Composites Science and Technology*, 64(2), 155–170.
- [51]. Birman, V., & Kardomateas, G. A. (2018). Review of ceramic matrix composites for high-temperature structural applications. *Composites Part B: Engineering*, 147, 1–18.
- [52]. Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2018). *Materials Science and Engineering: An Introduction* (10th ed.). John Wiley & Sons.
- [53]. Boyer, R., Welsch, G., & Collings, E. W. (1994). *Materials Properties Handbook: Titanium Alloys*. ASM International.
- [54]. Reed, R. C. (2006). *The Superalloys: Fundamentals and Applications*. Cambridge University Press.
- [55]. Schmidt, S., et al. (2010). Advanced ceramic matrix composite materials for current and future propulsion technology applications. *Acta Astronautica*, 66(1–2), 15–24.
- [56]. C. Morel, E. Baranger, J. Lamon, J. Braun, C. Lorrette. 2023. “The Influence of Internal Defects on the Mechanical Behavior of
- [35]. R. Naslain, “The design of the fiber/matrix interfacial zone in ceramic matrix composites”, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 29A, no. 9–10, pp. 1145–1155, 1998.
- [36]. S. D. Mesarovic et al., “Fracture and toughening in fiber-reinforced ceramic composites”, *Acta Materialia*, vol. 46, no. 12, pp. 4305–4321, 1998.
- [37]. D. Zhu and R. W. Bruce, “Evaluation of CMCs for high temperature aerospace applications”, *NASA Technical Report TM-2005-213566*, 2005.
- [38]. S. Zheng, Y. Song, G. Xie, B. Sundén. 2015. “An Assessment of Turbulence Models for Predicting Conjugate Heat Transfer for a Turbine Vane with Internal Cooling Channels”. *Heat Transfer Research* 46(11): 1039–1064. DOI: 10.1615/ HeatTransRes. 2015007514.
- [39]. Zivic, F. et al. (2021). *Ceramic Matrix Composites: Classifications, Manufacturing, Properties and Applications*, ResearchGate. p. 3-4.
- [40]. Hasselman, D. P. H., “Unified theory of thermal shock fracture initiation and crack propagation in brittle ceramics”, *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 52, no. 11, pp. 600–604, 1969.
- [41]. Naslain, R., “The design of the fiber/matrix interfacial zone in ceramic matrix composites”, *Composites Part A*, vol. 29, pp. 1145–1155, 1998.
- [42]. Marshall, D. B. & Cox, B. N., “A shear-lag analysis of bridged matrix cracks in brittle matrix composites”, *Mechanics of Materials*, vol. 15, pp. 145–159, 1993.
- [43]. Singh, M. et al., “Thermal conductivity and thermal shock behavior of ceramic matrix composites”, *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 25, pp. 1013–1019, 2005.
- [44]. Harlan, T. et al., “Thermal shock resistance of SiC/SiC composites under cyclic heating”, *Materials Science and Engineering A*, vol. 412, pp. 99–107, 2005.
- [45]. NASA TM-2005-213566, Zhu, D., “Evaluation of thermal shock resistance



- [69]. Riedel, R. et al., "Ceramic matrix composites via LSI: Properties and prospects", *Composites Science and Technology*, vol. 61, pp. 1873–1881, 2001.
- [70]. M. Singh, "Chemical vapor deposition of coatings for CMCs", *Surface and Coatings Technology*, vol. 151–152, pp. 102–110, 2002.
- [71]. Zok, F. W., "Design of fiber-reinforced ceramic composites", *Composites Science and Technology*, vol. 65, pp. 2466–2477, 2005.
- [72]. Marshall, D. B. and Cox, B. N., "Interfacial design in ceramic matrix composites", *Acta Materialia*, vol. 46, pp. 1501–1525, 1998.
- [73]. Levi, C. G., "Environmental barrier coatings for SiC-based CMCs", *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 30, no. 5, pp. 2037–2047, 2010.
- [74]. Singh, J. P., "Degradation of Si-based CMCs in combustion environments", *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 89, no. 12, pp. 3833–3842, 2006.
- [75]. Zhu, D., "Environmental durability of SiC-based ceramic matrix composites", *NASA/TM—2007-214765*, 2007.
- [76]. Levi, C. G., "Environmental barrier coatings for SiC-based CMCs", *MRS Bulletin*, vol. 30, no. 10, pp. 752–758, 2005.
- [77]. Pint, B. A., "Advanced environmental barrier coatings for gas turbine applications", *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 30, pp. 285–293, 2010.
- [78]. Choy, K. L., "Chemical vapour deposition of coatings for environmental protection of ceramic composites", *Surface and Coatings Technology*, vol. 200, no. 7, pp. 3014–3020, 2005.
- [79]. Timoshenko, S. P. and Gere, J. M., *Theory of Elastic Stability*, 2nd ed., McGraw-Hill, 1961.
- [80]. Librescu, L. and Song, O., "Thin-walled composite beams: Theory and application", *Applied Mechanics Reviews*, vol. 47, no. 12, pp. 487–504, 1994.
- [81]. Reddy, J. N., *Mechanics of Laminated Composite Plates and Shells*, CRC Press, 2004.
- Filament Wound SiC/SiC Composite Tubes under Uniaxial Tension". *Journal of the European Ceramic Society* 43(5): 1797–1807. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2022.12.040.
- [57]. J. A. DiCarlo and H. M. Yun, "Ceramic Matrix Composite behavior in turbine environments", *NASA TM-2000-209785*, 2000.
- [58]. Zok, F. W., "Ceramic-matrix composites enable revolutionary gains in gas turbines", *Annual Review of Materials Research*, vol. 41, pp. 441–465, 2011.
- [59]. Naslain, R., "Design, properties and applications of ceramic matrix composites", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 29, no. 9-10, pp. 1145–1155, 1998.
- [60]. D. Zhu, "High temperature mechanical behavior of SiC/SiC composites", *NASA Technical Report TM-2005-213566*, 2005.
- [61]. Bansal, N. P., "Handbook of Ceramic Composites", Springer, 2005.
- [62]. Pint, B. A., "EBC coatings for Si-based CMCs", *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 30, no. 11, pp. 285–293, 2010.
- [63]. Zok, F. W. et al., "Creep of advanced CMCs with engineered interfaces", *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 94, no. s1, pp. S267–S274, 2011.
- [64]. Mesarovic, S. D., "Multiscale modeling of creep in fiber-reinforced ceramics", *International Journal of Solids and Structures*, vol. 45, no. 1, pp. 196–210, 2008.
- [65]. P. F. Becher and M. K. Cinibulk, "Processing of ceramic matrix composites", *Journal of Materials Science*, vol. 35, pp. 4331–4344, 2000.
- [66]. Naslain, R., "The development of CVI process and its applications to CMCs", *Composites Part A*, vol. 29A, pp. 1145–1155, 1998.
- [67]. DiCarlo, J. A. and Yun, H. M., "Advanced CVI-SiC/SiC composites for turbine engines", *NASA TM-2000-209785*, 2000.
- [68]. Bansal, N. P., "Polymer infiltration and pyrolysis for low-cost CMCs", *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 85, pp. 1737–1744, 2002.



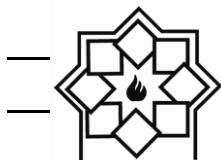
- [94]. Cheung, Y. K., the Finite Strip Method in Structural Mechanics, Pergamon Press, 1976.
- [95]. Eisenberger, M., "Buckling analysis by the finite-strip method", Computers & Structures, vol. 20, no. 1–3, pp. 179–187, 1985.
- [96]. Zivic, F. et al. (2021). Ceramic Matrix Composites: Classifications, Manufacturing, Properties and Applications, ResearchGate. p. 6.
- [97]. E.K. Arthur, E. Ampaw, S.T. Azeko, Y. Danyuo, B. Agyei-Tuffour, K. Kan-Dapaah, J.D. Obayemi. 2013. "Design of Thermally Reliable Environmental Barrier Coating for a SiC/SiC Ceramic Matrix Composites", International Journal of Composite Materials 3(6): 191–197. DOI: 10.5923/j.comaterials.20130306.08.
- [98]. R. Naslain; F. Langlais; R. Fedou (1989). "The CVI-Processing of Ceramic Matrix Composites". Journal de Physique Colloques. 50: C191–C207. doi: 10.1051/jphyscol:1989526.
- [99]. K. J. Probst; T. M. Besman; D. P. Stinton; R. A. Lowden; T. JK. Anderson; T. L. Starr (1999). "Recent advances in forced-flow, thermal-gradient CVI for refractory composites". Surface and Coatings Technology. 120–121: 250–258.
- [100]. Fang et al., A Review on Ceramic Matrix Composites and Environmental Barrier Coatings for Aero-Engine (Coatings, 2023).
- [101]. Timoshenko, S. and Gere, J. M., "Theory of Elastic Stability", McGraw-Hill, 1961.
- [102]. Javaheri, R. and Eslami, M. R., "Thermal buckling of functionally graded plates", AIAA Journal, 2002.
- [103]. Abdelouahab Tati et al., "Buckling analysis of FGM plates using higher-order shear deformation theory", Acta Mechanica, 2021.
- [104]. Wadee, M. A., and Farsi, M. N., "Mode interaction in local-global buckling of stiffened plates", International Journal of Solids and Structures, 2014.
- [105]. Allen, H. G., "Analysis and Design of Structural Sandwich Panels", Pergamon Press, 1969.
- [82]. European Space Agency (ESA), "Structural Design Principles for Spacecraft Components", ESA Technical Report, TR-EN-500, 2009.
- [83]. Timoshenko, S. P., and Gere, J. M., Theory of Elastic Stability, McGraw-Hill, 1961.
- [84]. Koiter, W. T., "On the stability of elastic equilibrium", NACA Technical Translation 834, 1967.
- [85]. Shrivastava, S.; Rajak, D.K.; Joshi, T.; Singh, D.K.; Mondal, D.P. Ceramic Matrix Composites: Classifications, Manufacturing, Properties, and Applications. Ceramics 2024, 7, 652–679. <https://doi.org/10.3390/ceramics7020043>.
- [86]. Kopeliovich, D. Fabrication of Ceramic Matrix Composites by Polymer Infiltration and Pyrolysis (PIP). SubSTech (Substances & Technologies). 2010. Available online: https://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=fabrication_of_ceramic_matrix_composites_by_polymer_infiltration_and_pyrolysis_pip (accessed on 15 June 2023).
- [87]. Reddy, J. N., Mechanics of Laminated Composite Plates and Shells, CRC Press, 2004.
- [88]. Kopeliovich, D. Fabrication of Ceramic Matrix Composites by Liquid Silicon Infiltration. SubSTech (Substances & Technologies). 2010. Available online: https://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=fabrication_of_ceramic_matrix_composites_by_liquid_silicon_infiltration_lsi (accessed on 15 June 2023).
- [89]. Zok, F. W., "Development and application of ceramic matrix composites", Annual Review of Materials Research, vol. 41, pp. 441–465, 2011.
- [90]. Timoshenko, S. P., and Gere, J. M., Theory of Elastic Stability, McGraw-Hill, 1961.
- [91]. Bazant, Z. P., and Cedolin, L., Stability of Structures, Dover Publications, 2010.
- [92]. Reddy, J. N., Mechanics of Laminated Composite Plates and Shells, CRC Press, 2004.
- [93]. Zienkiewicz, O. C., and Taylor, R. L., the Finite Element Method, Butterworth-Heinemann, 2005.



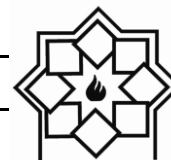
- "Mechanical behavior of porous ceramic matrix composites". *Journal of Materials Science*.
- [122]. Nooshin, H. and Disney, P. (2000). "Thermal buckling of anisotropic plates and shells". *Engineering Structures*.
- [123]. Yu, Q., et al. (2008). "Thermo-mechanical buckling of FGM composite plates". *Composite Structures*.
- [124]. Li, S., & Zhou, Y. H. (2013). "Buckling and postbuckling of CMC panels under thermal loads". *International Journal of Solids and Structures*.
- [125]. Wang, X., & Li, J. (2019). "Thermal buckling of composite ceramic panels with fiber reinforcement". *Aerospace Science and Technology*.
- [126]. Batra, R. C. (2005). "Buckling of thick functionally graded plates with temperature-dependent properties". *Computers & Structures*.
- [127]. Naslain, R. (2004). "Design, preparation and properties of non-oxide CMCs for application in engines and nuclear reactors: An overview". *Composites Science and Technology*, 64(2), 155-170.
- [128]. Kim, R. Y., & Sankar, B. V. (2000). "Buckling of composite cylindrical shells subjected to axial loads". *Composite Structures*, 48(3), 257-262.
- [129]. Chollon, G., & Naslain, R. (2011). "Oxidation behavior and mechanical properties of 2D SiC/SiC composites under compression". *Journal of the European Ceramic Society*, 31(3), 467-477.
- [130]. Naslain, R., et al. (2000). "Mechanical behavior of CVI-SiC/SiC composites at high temperature". *Ceramic Engineering and Science Proceedings*, 21(3), 189-196.
- [131]. Wang, X., & Reddy, J. N. (2000). "Buckling and postbuckling of laminated composite plates using higher-order shear deformation theory". *Composite Structures*, 50(3), 279-290.
- [132]. Noor, A. K., & Burton, W. S. (1990). "Assessment of computational models for multilayered composite plates and shells". *Applied Mechanics Reviews*, 43(4), 67-97.
- [106]. ICAS Proceedings, "Buckling interaction in composite stiffened panels", ICAS2020_0337.
- [107]. Brush, D. O. and Almroth, B. O., "Buckling of Bars, Plates, and Shells", McGraw-Hill, 1975.
- [108]. Reddy, J. N., "Mechanics of Laminated Composite Plates and Shells: Theory and Analysis", CRC Press, 2004.
- [109]. Zienkiewicz, O. C., and Taylor, R. L., "The Finite Element Method", McGraw-Hill, 2000.
- [110]. Bisagni, C., "Numerical and experimental investigation on the post-buckling behavior of composite shells", *Composite Structures*, 2000.
- [111]. Cheung, Y. K., "Finite Strip Method in Structural Analysis", Pergamon Press, 1976.
- [112]. Liew, K. M., and Wang, Q., "Buckling analysis of rectangular plates using finite strip method", *Engineering Structures*, 1998.
- [113]. Timoshenko, S. P., & Gere, J. M. (1961). *Theory of Elastic Stability* (2nd ed.). McGraw-Hill.
- [114]. Brush, D. O., & Almroth, B. O. (1975). *Buckling of Bars, Plates, and Shells*. McGraw-Hill.
- [115]. Noor, A. K., & Burton, W. S. (1992). "Assessment of computational models for thermo-mechanical buckling of composite structures". *Applied Mechanics Reviews*, 45(10), 419-446.
- [116]. Reddy, J. N. (2004). *Mechanics of Laminated Composite Plates and Shells: Theory and Analysis* (2nd ed.). CRC Press.
- [117]. Cheung, Y. K. (1976). *Finite Strip Method in Structural Analysis*. Pergamon Press.
- [118]. Singer, J., Arbocz, J., & Weller, T. (1998). *Buckling Experiments: Experimental Methods in Buckling of Thin-Walled Structures*. John Wiley & Sons.
- [119]. Naslain, R. (2004). "Design, preparation and properties of non-oxide CMCs for application in engines and nuclear reactors: an overview". *Composites Science and Technology*. 64(2): 155-170.
- [120]. Chawla, K. K. (2012). *Composite Materials: Science and Engineering*". Springer.
- [121]. Zok, F. W., & Levi, C. G. (2011).



- [146]. Chen, Y., et al. (2016). "Multi-scale modeling of damage and buckling in ceramic matrix composites". *Composites Part B: Engineering*, 88, 41–53.
- [147]. Morscher, G. N., et al. (2004). "Behavior of woven SiC/SiC ceramic matrix composites under high temperature compressive loading". *Journal of the American Ceramic Society*, 87(3), 486–492.
- [148]. Naslain, R. (2004). "Design, preparation and properties of non-oxide CMCs for applications in engines and nuclear reactors". *Composites Science and Technology*, 64(2), 155–170.
- [149]. Opila, E. J. (2003). "Oxidation and corrosion of ceramics". *Journal of the European Ceramic Society*, 22(15), 2813–2820.
- [150]. Zok, F. W. (2006). "Development and characterization of fiber-reinforced ceramic matrix composites". *Journal of the American Ceramic Society*, 89(11), 3309–3324.
- [151]. Wang, Y., & Wang, B. (2011). "Nonlinear buckling of SiC/SiC composite panels under different edge constraints". *Composite Structures*, 93(10), 2583–2590.
- [152]. Chen, L., et al. (2014). "Thermo-mechanical buckling analysis of functionally graded CMC panels under combined loading". *International Journal of Mechanical Sciences*, 82, 98–107.
- [153]. Morscher, G. N., & Gyekenyesi, J. P. (2006). "Testing of CMC materials in simulated engine environments". NASA Technical Memorandum, NASA/TM—2006-214433.
- [154]. Naslain, R. (2004). "Design, preparation and properties of non-oxide CMCs for application in engines and nuclear reactors: an overview". *Composites Science and Technology*, 64(2), 155–170.
- [155]. Chawla, K. K. (2012). *Ceramic Matrix Composites*, Springer.
- [156]. Sanchez-Herencia, A. J., et al. (2015). "Ceramic matrix composites for aeronautical applications". *Journal of the European Ceramic Society*, 35(1), 1–22.
- [157]. Levi, C. G., et al. (2002). "Environmental degradation of SiC/SiC composites in
- [133]. Nairn, J. A., & Hu, S. (1992). "Matrix microcracking in composites: I. Stress analysis". *International Journal of Fracture*, 57(1), 1–24.
- [134]. Shen, H. S. (2001). Thermal buckling and postbuckling behavior of composite plates. *Composite Structures*, 54(2–3), 141–150.
- [135]. Birman, V. (1996). Buckling of composite plates at elevated temperatures. *International Journal of Solids and Structures*, 33(18), 2557–2571.
- [136]. Birman, V., & Kardomateas, G. A. (2003). Thermal buckling of ceramic matrix composite plates. *Composites Part B: Engineering*, 34(1), 35–43.
- [137]. Singh, B. N., & Chakrabarti, A. (2002). Thermal buckling analysis of laminated composite plates. *Composite Structures*, 55(2), 151–159.
- [138]. Hutchinson, J. W. (1974). Imperfection sensitivity of externally pressurized spherical shells. *Journal of Applied Mechanics*, 41(2), 433–439.
- [139]. Talreja, R., & Singh, C. V. (2012). "Damage and failure of composite materials". Cambridge University Press.
- [140]. Karihaloo, B. L. (1995). "Fracture Mechanics and Structural Concrete". Longman.
- [141]. Rao, S. S. (2017). "Theories of Composite Laminates". CRC Press.
- [142]. Krenkel, W., & Berndt, F. (2005). "C/C–SiC composites for space application and advanced friction systems". *Materials Science and Engineering: A*, 412(1–2), 177–181.
- [143]. Salvado, R., & Ferreira, J. A. M. (2007). "Fatigue and damage tolerance of ceramic matrix composites with surface flaws". *International Journal of Fatigue*, 29(6), 1175–1185.
- [144]. Ladevèze, P., & Lubineau, G. (2001). "On a damage mesomodel for laminated composites". *Composites Science and Technology*, 61(15), 2149–2158.
- [145]. Talreja, R. (2006). "Damage and fatigue in composites—A personal account". *Composites Science and Technology*, 66(3–4), 337–344.



- online: <https://bioproimplants.com/portfolio-view/modular-thumb-implant> (accessed on 25 June 2023).
- [169]. Heat Transfer Equipment. EnggCyclopedia. Available online: <https://enggyclopedia.com/2011/05/heat-transfer-equipment/> (accessed on 25 June 2023).
- [170]. RLs for Nuclear Fuel and Cladding. Nuclear Engineering International. Available online: <https://www.neimagazine.com/features/featuretrls-for-nuclear-fuel-and-cladding-4198959/> (accessed on 25 June 2023).
- [171]. FC-BRS-01 Wall Sleeve. FuCare. Available online: <https://www.fucare.com/products-blast-resistant-wall-sleeves/90.html> (accessed on 25 June 2023).
- [172]. Types of Bearings. Fractory. Available online: <https://fractory.com/types-of-bearings/> (accessed on 25 June 2023).
- [173]. MOFLAME Ceramic Infrared DIY Heating Gas Burner with Gas Intake Nozzle Parts for Outdoor Indoor Heater, BBQ Stove. Oxyhydrogen Burner. Ubuy. Available online: <https://www.ubuy.co.in/product/1AF6484JA-moflame-ceramic-infrared-diyheating-burner-with-gas-intake-nozzle-parts-for-outdoor-indoor-heater-bbq-stove> (accessed on 25 June 2023).
- [174]. Silicon Carbide Varistors. Indiamart. Available online: <https://www.indiamart.com/proddetail/silicon-carbide-varistors-6855178788.html> (accessed on 25 June 2023).
- [175]. Multilayer Ceramic Chip Capacitors (MLCC). KYOCERA. Available online: <https://ele.kyocera.com/en/product/capacitor/mlcc/> (accessed on 25 June 2023).
- [176]. Ceramic Heat Sink for LED Lighting. Indiamart. Available online: <https://www.indiamart.com/proddetail/ceramic-heat-sink-for-led-lighting-7449542455.html> (accessed on 25 June 2023).
- [177]. AlN Laser Diode Carriers—Ceramic Material. FindLight. Available online: <https://www.findlight.net/lasers/semiconductorlasers/semiconductor-laser-accessories/aln-laser-diode-carriers-ceramic-material> (accessed on 25 June 2023).
- combustion environments". Journal of the American Ceramic Society, 85(5), 1177–1186.
- [158]. Bansal, N. P. (2005). Handbook of Ceramic Composites, Springer.
- [159]. DiCarlo, J. A., & Yun, H. M. (2000). "Ceramic matrix composite components for turbine engine applications". Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 30(3), 375–381.
- [160]. Krenkel, W. (2008). "CMC materials and technology for aerospace applications". Materials Science Forum, 561–565, 515–520.
- [161]. Padture, N. P. (2016). "Advanced structural ceramics in aerospace propulsion". Nature Materials, 15, 804–809.
- [162]. Advanced Materials for Next-Gen Turbines. Turbomachinery International. 2015. Available online: <https://www.turbomachinerymag.com/view/advanced-materials-for-next-gen-turbines> (accessed on 25 June 2023).
- [163]. Ceramic Matrix Composite Technology Is GE's Centerpiece Jet Propulsion Strategy for the 21st Century. GE Aerospace. 2019. Available online: <https://blog.geaerospace.com/technology/42869/> (accessed on 25 June 2023).
- [164]. Utomotive Carbon Ceramic Brake Rotors. CMC MAT. Available online: <https://www.cmcmat.com/> (accessed on 25 June 2023).
- [165]. Engine Valve: Definition, Construction, Types, and Working Explained in detail. The Mechanical Engineering.com. Available online: <https://themechanicalengineering.com/engine-valve/> (accessed on 25 June 2023).
- [166]. Covert Tactical PRESS Body Armour NIJIIIA (3A). Vestguard. CO. UK. Available online: <https://www.vestguard.co.uk/vestguard-covert-tactical-press-body-armour-vest-nij-level-3a.html> (accessed on 25 June 2023).
- [167]. How Does A Marine Propeller Shaft Seal Work. Pacific Marine and Industrial. Available online: <https://www.pacificmarine.net/engineering/shaft-seal-systems/how-does-a-marine-dripless-propeller-seal-work.htm> (accessed on 25 June 2023).
- [168]. Modular Thumb Implant. BIOPRO. Available



- [178]. Hatta, H., et al. (2010). "Nonlinear finite element analysis of SiC/SiC composite structures under high-temperature loading". *Composites Science and Technology*, 70(2), 287–294.
- [179]. De Moraes, M., et al. (2019). "Buckling analysis of ceramic matrix composite plates using high-order shear deformation theory". *Thin-Walled Structures*, 145, 106424.
- [180]. Singh, M. (2006). "Design challenges and modeling issues for CMC components". *Journal of Materials Engineering and Performance*, 15(5), 565–571.
- [181]. Evans, A. G., et al. (2001). "The role of interfaces in fiber-reinforced ceramic matrix composites". *Journal of the American Ceramic Society*, 84(9), 1999–2012.
- [182]. Chawla, N., & Chawla, K. K. (2006). "Metal-matrix composites in ground transportation". *Advanced Engineering Materials*, 8(9), 798–806.
- [183]. Fischer, A. et al. (2013). "Progress in the mechanical modeling of CMCs for design purposes". *Journal of the European Ceramic Society*, 33(3), 463–472.
- [184]. Bertolino, G. et al. (2021). "Buckling behavior of ceramic matrix composites at elevated temperatures". *Composite Structures*, 261, 113312.
- [185]. Zhang, Y., et al. (2020). "Multiscale modeling of thermomechanical behavior of ceramic matrix composites". *Materials Today Communications*, 24, 101043.
- [186]. Fahrenholtz, W. G., et al. (2015). "Ultra-high temperature ceramics: Applications, issues and prospects". *Journal of the European Ceramic Society*, 32(10), 2319–2329.

A Review of Buckling Analysis of Structures Made of Ceramic Matrix Composites

Mohammad Hossein Didehban Dogori, Mehdi Hosseini*

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Malayer University, Malayer, Iran

* m.hosseini27@gmail.com

Abstract: Ceramic Matrix Composites (CMCs) have gained significant attention in recent years due to their unique properties such as high-temperature resistance, chemical stability, high specific strength, and resistance to thermal shock and corrosion. With the increasing use of these materials in lightweight and high-performance structures, particularly in aerospace, gas turbines, advanced vehicles, and defense systems, the accurate analysis of their buckling behavior has become increasingly important. This review paper presents a comprehensive overview of the buckling analysis of structures made of CMCs. It begins by examining the thermo-mechanical characteristics of CMCs, followed by fundamental concepts of buckling, including distinctions between local and global buckling, and common analytical and numerical approaches such as the energy method, finite element method (FEM), and finite strip method (FSM). The buckling behavior of various CMC structures, including plates, shells, and columns under different thermal, loading, and boundary conditions is then discussed. Moreover, the effects of anisotropy, lay-up configurations, structural defects, cracks, and temperature-dependent material properties on buckling response are analyzed. Finally, the industrial applications of CMCs and the current challenges in their precise design and analysis are reviewed. The findings highlight the necessity of developing advanced hybrid analytical-experimental methods, nonlinear multiscale modeling, and experimental tests under realistic conditions to achieve more accurate and reliable structural designs using CMCs.

Keywords: Buckling analysis, Composite structure, Ceramic matrix.