

واژه‌های کلیدی:

فوم ترکیبی
کامپوزیت‌های پلیمری
میکروبالن
خواص فیزیکی مکانیکی

آشنایی با فوم‌های ترکیبی و خواص آن‌ها

بهروز جعفری^۱، احمدرضا فرمانی^۲، امیر ارشاد لنگرودی^{۳*}، حمید صالحی مبارکه^۳

۱ تهران، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، پژوهشکده مهندسی، گروه پلیمری‌زاسیون
۲ تهران، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، پژوهشکده فرآیند، گروه رنگ و روکش‌های سطح
۳ تهران، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، پژوهشکده علوم پلیمر، گروه علوم پلیمر

چکیده ...

فوم‌های ترکیبی مواد کامپوزیتی هستند که فاز تقویت‌کننده آن‌ها را میکروبالن‌ها تشکیل می‌دهند. میکروبالن‌ها یا میکروکره‌ها، گوی‌های توخالی پر شده با گاز هستند که قطری بین ۱ تا ۱۰۰۰ میکرومتر دارند. فوم‌های ترکیبی به دلیل خواص مطلوبی مانند سبکی، استحکام فشاری بالا، جذب آب پایین، ثابت دی‌الکتریک پایین و ... در صنایع مختلف به ویژه حمل و نقل و هوافضا، کاربردهای روز افزونی یافته‌اند. خواص این مواد به جنس میکروبالن‌ها و رزین تشکیل‌دهنده ماتریس بستگی دارد. در سال‌های اخیر انواع جدیدی از این فوم‌ها با نام "فوم‌های ترکیبی درجه‌بندی شده براساس عملکرد" و نیز "فوم‌های ترکیبی بر پایه مواد سیمانی" معرفی شده‌اند. با توجه به اهمیت کاربردی این مواد در صنعت، بررسی‌های ریخت‌شناسی و همچنین تحقیقات گسترده با هدف بهبود خواص مکانیکی، دینامیکی-مکانیکی، حرارتی و الکتریکی آن‌ها انجام شده است. در این پژوهش‌ها، روش‌های مختلف مانند تغییر ضخامت و جنس میکروبالن‌ها، بهبود سطح مشترک ماتریس و میکروبالن و همچنین استفاده از افزودنی‌های گوناگون نظیر نانو ساختارها و ... برای ایجاد خواص متناسب با کاربردهای روز افزون فوم‌های ترکیبی به کار گرفته شده است.

*پست الکترونیکی مسئول مکاتبات:
A.Ershad@ippi.ac.ir

۱ مقدمه

فوم‌های ترکیبی مواد مهندسی هستند که از فاز ماتریس و فاز تقویت‌کننده یعنی میکروبالن (Microballoon) تشکیل شده‌اند. طبق تعریف انجمن آمریکایی آزمون مواد (ASTM)، فوم ترکیبی، ماده‌ای شامل گوی‌های تو خالی به عنوان پرکننده در ماتریس رزینی است [۱]. فوم‌های ترکیبی به عنوان فوم‌های کامپوزیتی نیز شناخته می‌شوند زیرا میکروبالن‌ها به عنوان تقویت‌کننده ماتریس در نظر گرفته می‌شوند. البته باید توجه داشت که این گوی‌های تو خالی معمولاً در اندازه میکرومتری هستند و به همین دلیل میکروبالن نامیده می‌شوند. میکروکره‌های تو خالی (Hollow Microsphere) یا میکروبالن‌ها ذرات کروی پر شده با گاز هستند که قطری بین $1 \mu\text{m}$ تا $1000 \mu\text{m}$ دارند. میکروبالن‌ها توانایی بالقوه‌ای در ارائه خواص سودمند مانند چگالی موثر کم و سطح ویژه زیاد دارند. ضخامت دیواره آن‌ها در گستره ۱ تا ۱۰٪ از قطر کره متغیر است. مواد به کار رفته در دیواره آن‌ها ممکن است از جنس شیشه، سرامیک‌های اکسیدی، اکسیدهای مخلوط، سیلیکات‌ها و آلومینوسیلیکات‌ها، پلیمرها یا حتی فلزات باشد. از جنبه‌های مهم کاربردی آن‌ها می‌توان به کاهش وزن مواد، کپسولی شدن (Encapsulation) و تثبیت مواد زیست‌فعال و کاتالیست‌های فعال، اصلاح استحکام ضربه‌ای ترکیبات، عایق‌سازی و صوت‌شناسی، کاربردهای دارویی یا پزشکی و سامانه‌های رهایش دارو و ... اشاره کرد. به طور کلی میکروبالن‌ها را می‌توان به چهار دسته کلی میکروبالن‌های پلیمری، معدنی، فلزی و هیبریدی تقسیم‌بندی کرد [۱ و ۲]. در جدول ۱ مقایسه خواص کلی انواع میکروبالن‌ها آورده شده است. میکروبالن‌ها با دو روش شیمیایی و فیزیکی ساخته می‌شوند. در روش شیمیایی، میکروبالن‌ها در نتیجه واکنش شیمیایی تشکیل شده، به پایداری می‌رسند؛ در صورتی که مبنای روش‌های فیزیکی تغییر شکل ماده آماده به میکروبالن، استوار است [۱-۳].

مواد قابل استفاده در فاز زمینه فوم‌های ترکیبی،

شامل پلیمرها، فلزات و سرامیک‌ها است. در تهیه فوم‌های ترکیبی از هر دو نوع پلیمرهای گرماسخت (Thermoset) و گرمانرم (Thermoplastic) استفاده می‌شود. مهم‌ترین رزین‌های گرماسخت مورد استفاده عبارتند از: اپوکسی‌ها، فنولیک‌ها، سیانات‌استرها، بیس‌مالئیدها، پلی‌استرهای غیراشباع و پلی‌یورتان‌ها. مثال‌هایی از رزین‌های گرمانرم مورد استفاده در تهیه این مواد نیز عبارت است از: پلی‌اتیلن، پلی‌پروپیلن، پلی‌استایرن و نایلون‌ها [۱]. در تهیه فوم‌های ترکیبی معمولاً از رزین‌های گرماسخت استفاده می‌شود؛ زیرا این مواد شرایط فرآیند پذیری مطلوبی دارند. به عنوان مثال می‌توان به گرانیروی پایین این مواد اشاره کرد که در نتیجه آن، فرآیند اختلاط میکروبالن و رزین به آسانی و بدون نیاز به اعمال تنش بالا امکان پذیر است. این موضوع از این جهت مورد اهمیت است که به علت ضخامت کم دیواره، میکروبالن‌ها به شدت نسبت به تنش برشی حساس بوده، دچار شکستگی می‌شوند و عدم توجه به این موضوع باعث افت شدید خواص فوم‌های ترکیبی می‌شود [۱]. همچنین فوم‌های ترکیبی گرماسخت می‌توانند در دماهای بسیار کمتر از فوم‌های ترکیبی گرمانرم فرآوری شوند و این مسئله می‌تواند از نظر انرژی مورد نیاز برای تهیه این مواد قابل توجه باشد. علاوه بر این، فوم‌های ترکیبی گرماسخت نسبت به حلال‌ها و مواد شوینده مقاومت بیشتری دارند. اما رزین‌های گرمانرم مصرفی در تهیه فوم‌های ترکیبی چقرمگی بالاتری نسبت به مواد گرماسخت دارند [۱]. میکروبالن‌هایی که در تهیه فوم‌های ترکیبی استفاده می‌شوند، دارای چگالی کم و استحکام فشاری زیادی هستند و جذب آب پایینی دارند. میکروبالن‌ها معمولاً با اندازه ذرات، ضخامت دیواره و چگالی معرفی می‌شوند. رایج‌ترین میکروبالن‌های مورد استفاده در تهیه فوم‌های ترکیبی، میکروبالن‌های شیشه‌ای هستند، در حالی که میکروبالن‌های پلیمری دارای تنوع زیادی هستند و عموماً از اپوکسی، پلی‌استر غیر اشباع، رزین سیلیکون، فنولیک‌ها، ملامین فرم آلدهید، پلی‌وینیل کلراید، پلی‌پروپیلن و پلی‌استایرن تهیه می‌شوند [۱].

جدول ۱ مقایسه خواص میکروبالن‌های مختلف بر اساس جنس آن‌ها [۳]

انواع میکروبالن‌ها	خواص	کاربرد
میکروبالن‌های فلزی	هدایت الکتریکی بالا و استحکام زیاد	صنایع الکتریکی، پلیمرهای هادی دما و الکتروسیسته
میکروبالن‌های پلیمری	چگالی کم، گستره اندازه و ضخامت دیواره متنوع، هدایت حرارتی کم، چسبندگی زیاد، نفوذ پذیری زیاد	صنایع داروسازی، آرایشی بهداشتی، نظامی، کاغذ سازی، فضایی، کامپوزیت‌های سبک، پرکننده مواد ساختمانی، گرمانرم و رزین‌ها
میکروبالن‌های معدنی	خواصی بین میکروبالن‌های پلیمری و فلزی دارند	حامل‌های کاتالیزور واکنش‌های شیمیایی، غشا و جداسازی، صنایع پوشش، مواد ساینده
میکروبالن‌های هیبریدی	با توجه به مواد تشکیل دهنده خواص میکروبالن‌های متفاوت را ارائه می‌دهد	بررسی جریان دینامیک سیالات، صنایع فضایی، اتومبیل، آرایشی بهداشتی، تصفیه آب

جدول ۲ برخی از مهم‌ترین کاربردهای فوم‌های ترکیبی در صنایع مختلف [۱]

نام صنعت	نوع کاربرد
صنایع دریایی (شناوری) (Buoyancy)	عایق حرارتی لوله‌های زیر دریا-بدنه زیردریایی و شناورها
صنایع هوا-فضا	محفظه رادار (Radom)
صنایع ورزشی	مواد دارای حافظه شکلی

طرف و هسته، شروع می‌شود اما در ساختارهای ساندویچی با هسته فوم، شکست به علت همگن بودن ساختار، قابلیت شروع از هر نقطه‌ای را دارد. بنابراین استحکام فوم عامل مهمی در طراحی این ساختارها است [۴]. فوم‌های ترکیبی به علت ساختار و آرایش آن‌ها، تحت بارگذاری فشاری، رفتاری متفاوت از سایر مواد تجاری مورد استفاده به عنوان هسته ساختار ساندویچی از خود نشان می‌دهند. قابلیت تحمل بالای خسارت در فوم‌های ترکیبی این مواد، مناسب برای کاربردهای هوافضا هستند [۵]. در بیشتر کاربردهای بیان شده، فوم‌های ترکیبی به عنوان هسته ساختار ساندویچی در صنایع مورد استفاده قرار می‌گیرند.

از آنجایی که فوم‌های ترکیبی به آسانی قابلیت ماشین‌کاری به شکل‌های مختلف را دارند و همچنین امکان تهیه این مواد در بازه وسیعی از چگالی وجود دارد؛ از این رو فوم‌های ترکیبی مورد توجه روز افزون واقع شده‌اند. در جدول ۲ به برخی از مهم‌ترین کاربردهای این مواد در صنایع مختلف اشاره شده است.

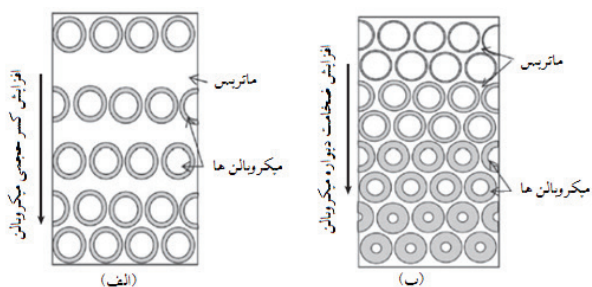
پس از معرفی فوم‌های ترکیبی و بیان کاربردهای آن‌ها در ادامه طبقه‌بندی رایج فوم‌های ترکیبی ارائه شده است. همچنین "فوم‌های ترکیبی درجه بندی شده از نظر عملکرد" به عنوان گونه مهندسی شده و "فوم‌های ترکیبی بر پایه مواد سیمانی" به عنوان گونه جدید و مهم این دسته از کامپوزیت‌های مهندسی به طور مختصر معرفی می‌شوند و در نهایت به ریخت‌شناسی، خواص فیزیکی، مکانیکی، رفتار دینامیکی و جذب آب فوم‌های ترکیبی دارای بستر پلیمری پرداخته می‌شود.

این فوم‌ها به علت استحکام فشاری بالا قابلیت تحمل خسارت، جذب آب پایین، بازده ساختاری بالا و عایق قوی حرارتی به طور گسترده‌ای در تولید هسته ساختارهای ساندویچی کامپوزیتی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در ساختارهای لانه زنبوری مورد استفاده در هسته ساختارهای ساندویچی، شکست از محل اتصال سطوح پوسته‌های دو

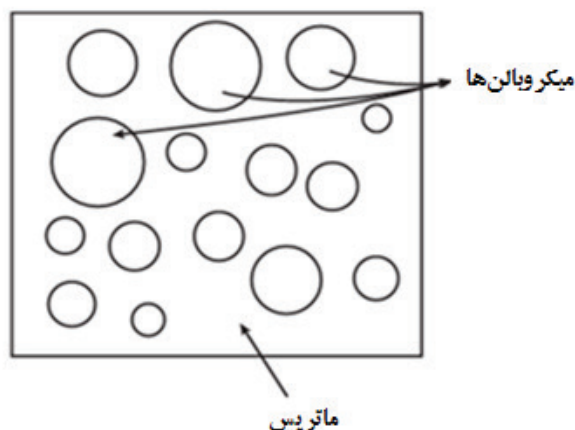
۲ طبقه بندی فوم‌های ترکیبی

فوم‌های ترکیبی در دو دسته دو فازی و سه فازی طبقه‌بندی

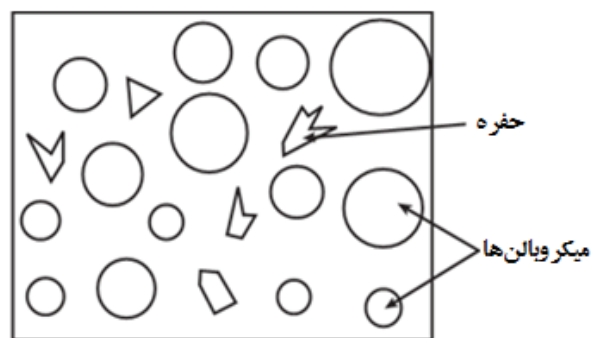
یافته‌اند. این مواد با تغییر در کسر حجمی یا اندازه طول یا ضخامت ذرات به دست می‌آیند. فوم‌های ترکیبی درجه بندی شده از نظر عملکرد (Functionally Graded Syntactic Foams) را می‌توان با ایجاد اختلاف غلظت در کسر حجمی میکروبالن [نوع VF] یا ضخامت دیواره میکروبالن (نسبت به شعاع) [نوع RR] در طول یا ضخامت فوم ترکیبی برای ایجاد تغییر در چگالی و خواص مکانیکی فوم به دست آورد. طرحواره انواع VF و RR این فوم‌ها در شکل ۳ نشان داده شده است. سامانه‌های نوع VF دارای معایبی از قبیل امکان تاب خوردگی یا تورم محلی در صورت قرار گرفتن در معرض تغییرات دما و رطوبت است که به علت تفاوت در مقدار رزین در طول یا ضخامت قطعه ساخته شده اتفاق می‌افتند. در مواردی که چگالی ذرات کمتر از چگالی ماتریس رزینی است، اختلاف غلظت در ساختمان فوم، محدودیتی جدی برای تولید فوم با کمترین چگالی محسوب می‌شود و همچنین باعث توزیع ناهمگن تنش و در نتیجه شکست زودرس می‌شود. در نوع RR کسر حجمی ذرات می‌تواند به عنوان عامل اضافی برای کنترل خواص فوم ترکیبی مورد استفاده قرار بگیرد [۶ و ۷]. در پژوهش Gupta و همکارانش، افت قابل توجه تنش (تقریباً ۴۰٪- پس از بیشینه مقدار استحکام در نوع VF مشاهده شد. معایب موجود در نوع VF در نوع RR مشاهده نمی‌شود که باعث کنترل بهتر در استحکام و جذب انرژی می‌شود. فوم ترکیبی نوع RR می‌تواند بدون افت قابل توجه در استحکام تا کرنش ۶۰٪-۷۵٪ در مقابل فشار مقاومت کند. این مواد با کسر حجمی یکسانی از میکروبالن‌ها در سراسر ساختار، باعث حذف اثرات نامطلوب فوم‌های نوع VF می‌شوند. مقدار کل انرژی جذب شده در FGFSF از نوع RR ۳ تا ۵ برابر بیشتر از FGFSF نوع VF و فوم‌های ترکیبی ساده است. بنابراین استفاده از FGFSF نوع RR در کاربردهای زیربنایی می‌تواند به طور قابل ملاحظه‌ای ایمنی سازه را تحت بارگذاری فشاری بالا ببرد [۶ و ۷].



شکل ۳ طرحواره فوم‌های درجه بندی شده از نظر عملکرد (الف) نوع



شکل ۱ طرحواره فوم های ترکیبی دو فازی [۱]



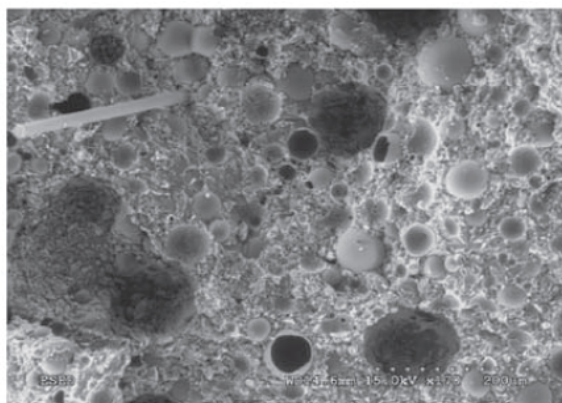
شکل ۲ طرحواره فوم های ترکیبی سه فازی [۱]

می‌شوند. آرایش فشرده‌ای از میکروبالن‌ها در بستر، فوم‌های ترکیبی دو فازی را تشکیل می‌دهد. در شکل ۱ ساختار فوم‌های ترکیبی دو فازی نشان داده شده است. فوم‌های ترکیبی سه فازی، متشکل از رزین، میکروبالن و فضاهای خالی هستند. در صورت به دام افتادن و حبس هوا و در نتیجه ایجاد فضاهای خالی (Void) در ساختمان فوم، ساختار سه فازی ایجاد می‌شود. در برخی موارد نیز فیلم نازکی از رزین، اطراف خوشه‌های میکروبالن‌ها تشکیل شده و از نفوذ رزین بین میکروبالن‌ها جلوگیری می‌کند. در شکل ۲ ساختار سه فازی نشان داده شده است [۱]. با توجه به این که ممانعت از ایجاد هرگونه فضای خالی در ساختمان فوم ترکیبی تقریباً غیرممکن است، می‌توان گفت ساختار دوفازی ساختاری کاملاً فرضی است.

۲-۱ فوم‌های درجه بندی شده از نظر عملکرد (FGSF)

مواد درجه بندی شده از نظر عملکرد به علت تقاضای روز افزون در کاربردهای مدرن مهندسی، اهمیت ویژه‌ای

VF (ب) نوع RR [۶]



۲-۲ فوم‌های ترکیبی بر پایه مواد سیمانی

فوم‌های ترکیبی بر پایه مواد سیمانی (Cement Based Syntactic Foams) توسط Li و همکاران معرفی شده است [۸]. این نوع از فوم‌های ترکیبی کامپوزیتی چند فازی است که از پخش میکروبالن‌ها در لاتکس لاستیکی که باعث چقرمه و چسبناک شدن ماتریس می‌شود، به وجود می‌آید. سایر فازهای این کامپوزیت شامل مقادیر کم نانو الیاف و نانورس است. فوم‌های ترکیبی بر پایه مواد سیمانی چسبناک ظرفیت بالاتری برای جذب انرژی ناشی از ضربه بدون تأثیر بر استحکام آن در مقایسه با سایر مواد سیمانی دارند. در مقایسه با هسته‌های بر پایه فوم‌های پلیمری مشابه، فوم‌های ترکیبی بر پایه مواد سیمانی چسبناک، ظرفیت قابل ملاحظه‌ای در جذب انرژی دارند. لاتکس لاستیکی، ماتریس سیمانی چسبناک را چقرمه کرده، باعث ذخیره بیشتر انرژی الاستیک می‌شود. میکروبالن‌ها ضمن ایجاد کاهش وزن در ماده به شدت سبب حفظ آب شده، سازوکار جذب انرژی در مقیاس میکرو را فراهم می‌کنند. نانورس، ساختار بلورهای هیدرات سیمانی را بهبود می‌دهد. میکروبالن‌ها و میکروالیاف، مکان‌های جذب انرژی را با سازوکارهایی نظیر خرد شدن میکروبالن‌ها، جدایش سطح مشترک میکروبالن‌ها و ماتریس، ایجاد میکروتُرک‌ها در ماتریس و بیرون کشیده شدن الیاف افزایش می‌دهند [۸]. شکل ۴ سطح شکست فوم‌های ترکیبی بر پایه مواد سیمانی چسبناک را نشان می‌دهد که در آن خرد شدن میکروبالن، جدایش سطح مشترک و بیرون آمدن الیاف به

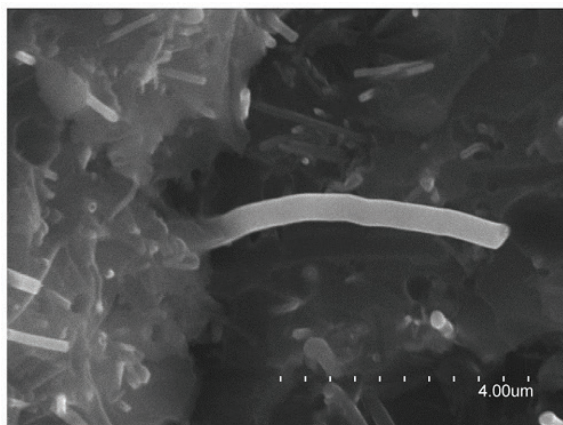
شکل ۴ سازوکارهای جذب انرژی در مقیاس میکرو در فوم‌های ترکیبی بر پایه مواد سیمانی [۸]

وضوح دیده می‌شود. این موارد به عنوان جاذب انرژی ضربه عمل کرده، ظرفیت جذب انرژی را افزایش می‌دهند. میکروتُرک‌های ماتریس نیز در شکل قابل مشاهده است. پدید آمدن میکروتُرک‌ها نیز انرژی ضربه را جذب می‌کند. با وجود این به علت وجود لاستیک و اصلاح چقرمگی ماتریس سیمانی چسبناک به وسیله آن میکروتُرک‌ها رشد نکرده، به ترک‌های بزرگ تبدیل نمی‌شوند. نتیجه این فرآیند جلوگیری از شکست ناگهانی ساختار است.

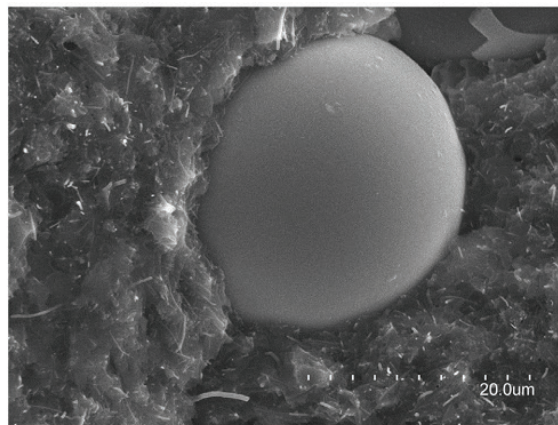
۳ مروری بر مطالعات انجام شده

۳-۱ ریخت‌شناسی

در کامپوزیت‌های پلیمری برای به دست آوردن خواص مناسب، توزیع یکنواخت ذرات بدون تشکیل کلوخه لازم است. کلوخه‌ای شدن ذرات در اثر نیروی چسبندگی به سه



(ب)



(الف)

شکل ۵ تصویر SEM سطح شکست فوم ترکیبی حاوی ۱۰٪ وزنی از CNF (الف) میکروبالن شیشه در محاصره رزین حاوی نانو الیاف کربن (ب) نانو الیاف کربن با بزرگنمایی بیشتر [۱۰]

وسایل الکترونیک که نیازمند هدایت حرارتی بیشتری است، استفاده از فوم‌های ترکیبی پوشش داده شده با نانولوله‌های کربنی را پیشنهاد دادند. برای تهیه این میکروبالن‌ها ابتدا به کمک روش جاننشانی بدون الکترون نانوذرات نیکل بر روی میکروبالن‌های شیشه‌ای پوشش داده شدند و سپس به کمک روش لایه نشانی از فاز بخار (CVD) نانولوله‌های کربنی بر روی آن‌ها رشد داده شدند. بررسی تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی و عبوری نشان می‌دهد که نانولوله‌های کربنی به خوبی سطح میکروبالن‌ها را پوشش داده‌اند (شکل ۶). مقدار هدایت حرارتی فوم‌های ترکیبی حاصل، نسبت به فوم‌های ترکیبی معمولی، ۸۶٪ افزایش نشان داد.

۲-۳ خواص مکانیکی

استحکام فشاری بالای فوم‌های ترکیبی به حضور میکروبالن‌ها در ساختار آن‌ها نسبت داده می‌شود. در فوم‌های ترکیبی سه فازی (واقعی) شکل و مقدار فضاهای خالی نیز تأثیر قابل توجهی بر خواص مکانیکی دارند.

۱-۲-۳ خواص فشاری

Bunn و همکارانش [۱۳] خواص فشاری فوم‌های ترکیبی ساخته شده با میکروبالن‌های فنولیک را در کسرهای حجمی متفاوت بررسی کردند. آن‌ها مشاهده کردند با افزایش کسر حجمی میکروبالن‌ها، استحکام فشاری فوم‌های ترکیبی ساخته شده کاهش می‌یابد.

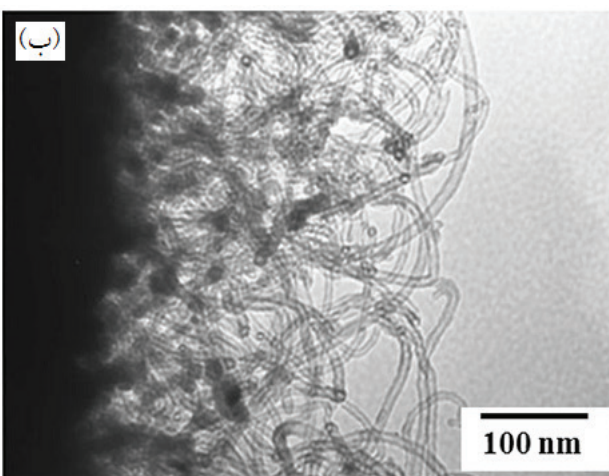
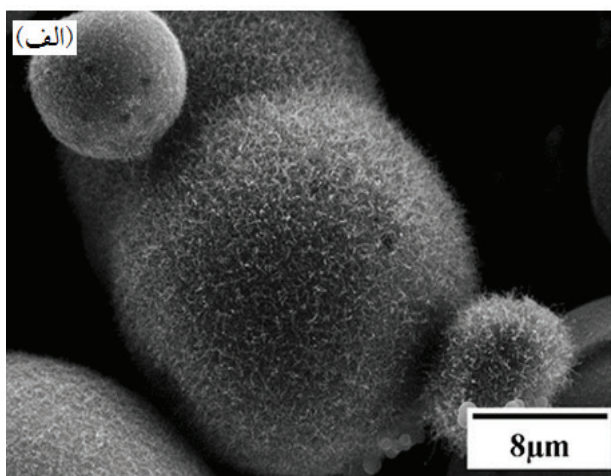
Gupta و همکارانش [۱۴] خواص مکانیکی فوم‌های ترکیبی را برحسب نسبت شعاع‌ها مورد بررسی قرار دادند.

دلیل مکانیکی، الکترواستاتیکی و مولکولی رخ می‌دهد [۹]. با کاهش اندازه ذرات، نیروی گرانشی و نیروی چسبندگی کاهش می‌یابد. با توجه به این‌که نیروی گرانشی با توان سوم و نیروی چسبندگی با توان اول یا دوم قطر میکروبالن‌ها متناسب است، با کاهش اندازه ذرات نیروی چسبندگی غالب شده، بنابراین میزان کلوخه‌ای شدن در ذرات کروی با قطر بزرگ‌تر، کمتر خواهد شد [۹].

Poveda و همکارانش [۱۰] فوم ترکیبی برپایه رزین اپوکسی/ میکروبالن شیشه را تهیه کرده و تأثیر نانو الیاف کربن (CNF) را بر آن بررسی کردند. شکل ۵ سطح شکست فوم ترکیبی شامل ۱۰٪ وزنی CNF را بر سطح شکست فوم ترکیبی حاصل نشان می‌دهد. کسر وزنی نسبتاً بالای CNF منجر به شکست سخت و زبر می‌شود. این زبری‌ها مسیر رشد ترک‌ها را از بین برده، فرایند رشد ترک‌ها به تعویق می‌افتد که در نهایت باعث افزایش استحکام فوم‌های ترکیبی می‌شود.

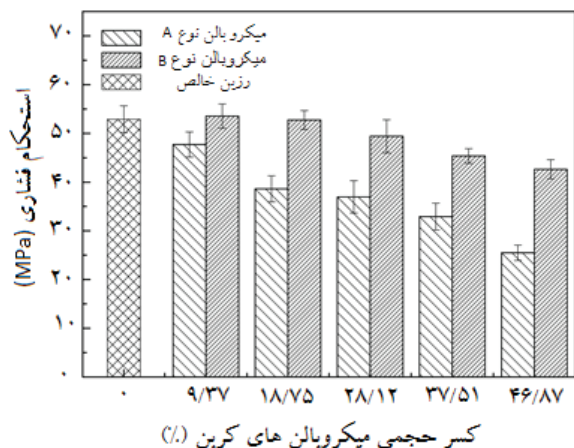
بر اساس گزارش Li و همکارانش [۱۱]، در نمونه تحت بار، شکاف‌ها از محل حفره‌های بزرگ آغاز می‌شوند. زمانی که فوم ترکیبی تحت فشار قرار می‌گیرد میکروبالن‌ها خرد شده و خرده‌ها و حفره‌های بزرگ در ماتریس ایجاد می‌کنند که می‌تواند دلیل شروع ترک‌ها باشد.

یکی از روش‌های تولید فوم‌های ترکیبی نانوکامپوزیتی با مورفولوژی و خواص ویژه، استفاده از میکروبالن‌های پوشش داده شده با نانوذرات است. از مهم‌ترین مزایای این روش جلوگیری از تجمع نانوذرات در ماتریس پلیمری است. Bhat و همکارانش [۱۲] برای کاربرد فوم‌های ترکیبی در



شکل ۶ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی و عبوری میکروبالن‌های پوشش داده شده با نانولوله‌های کربنی (الف) تصویر SEM (ب) تصویر TEM [۱۲]

فشاری بیشتری نسبت به میکروبالن‌های نوع A وجود دارد. علت را می‌توان به تأثیر عامل اتصال و برهم‌کنش بهتر میکروبالن‌ها با ماتریس پلیمری نسبت داد.



شکل ۷ مقایسه استحکام فشاری به عنوان تابعی از کسر حجمی میکروبالن کربن [۱۶]

۳-۲-۲ خواص کششی و خمشی فوم‌های ترکیبی

Wouterson و همکارانش [۱۷] خواص کششی فوم‌های ترکیبی اپوکسی با سه نوع میکروبالن را بررسی کردند. ۱۵ K و ۴۶ K میکروبالن‌های شیشه‌ای با ضخامت دیواره ۰/۷۰ و ۱/۳۵ میکرومتر هستند و BJO-۰۹۳ میکروبالنی از نوع فنولیک با ضخامت دیواره ۱/۸۴ میکرومتر است. شکل ۸ (الف و ب) به ترتیب استحکام کششی ویژه (σ_c/ρ) و مدول یانگ ویژه (E_c/ρ) سه نوع فوم ترکیبی با ترکیب درصدی متفاوت میکروبالن را نشان می‌دهد. با افزایش ۱۰٪ حجمی از میکروبالن، افزایش چشمگیری در استحکام ویژه فوم ترکیبی نسبت به رزین اپوکسی خالص مشاهده می‌شود. با افزایش میکروبالن‌ها به بیش از ۱۰٪ حجمی، استحکام ویژه روندی نزولی طی می‌کند؛ ولی با این وجود در کسر حجمی ۵۰٪ از میکروبالن، استحکام ویژه بیشتر از رزین خالص است.

Gupta و همکارانش [۱۸] خواص کششی شبه ایستای (Quasi-Static) فوم‌های ترکیبی حاوی میکروبالن‌های شیشه‌ای را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نتیجه گرفتند که استحکام کششی با افزایش چگالی میکروبالن افزایش، و با افزایش کسر حجمی آن (در نمونه‌های دارای میکروبالن‌های با چگالی یکسان) کاهش می‌یابد. همچنین آن‌ها به این نتیجه رسیدند که با افزایش چگالی میکروبالن (ضخامت دیواره آن) مدول کششی افزایش می‌یابد.

Gupta و همکارانش [۱۹] آزمون خمش سه و چهار نقطه‌ای

نسبت شعاع‌ها بصورت نسبت شعاع داخلی به خارجی میکروبالن‌ها تعریف می‌شود. تفاوت در نسبت شعاع‌ها باعث ایجاد تفاوت چگالی در فوم‌های ترکیبی حاصل می‌شود. نسبت شعاع کمتر، میکروبالن با چگالی بیشتر را ایجاد می‌کند. آن‌ها خواص فشاری فوم‌های ترکیبی تولید شده با پنج نمونه میکروبالن با نسبت شعاع‌های متفاوت (چگالی‌های متفاوت) را مورد بررسی قرار دادند و دریافتند که هرچه نسبت شعاع میکروبالن‌های مورد استفاده در تولید فوم ترکیبی کمتر باشد، مدول و استحکام فشاری فوم حاصل بیشتر خواهد بود. نتایج آزمون فشاری از پهنا و لبه فوم‌های ترکیبی تهیه شده نشان داد که نمونه‌هایی که از لبه تحت فشار قرار می‌گیرند، استحکام و مدول فشاری بیشتری نسبت به نمونه‌هایی دارند که از پهنا تحت فشار قرار می‌گیرند.

Gupta و همکارانش [۱۵] در تحقیق دیگری با بررسی خواص مکانیکی فوم‌های ترکیبی حاوی میکروبالن‌های شیشه‌ای با چگالی متفاوت دریافتند که فوم‌های ترکیبی با مدول و استحکام فشاری بالا از میکروبالن‌های با چگالی بالا ($۳۵۰-۶۶۰ \text{ kg/m}^3$) تهیه می‌شوند. این فوم‌ها دارای معایبی همچون چگالی بالا و کرنش در شکست پایین (در محدوده ۸-۱۰٪) هستند، این محدودیت‌ها کاربرد آن‌ها را در مواردی که نیاز به مواد سبک وجود دارد، دچار مشکل می‌کند. باید توجه داشت که فوم‌های ترکیبی تهیه شده با میکروبالن‌های با چگالی پایین ($۲۰۰-۳۵۰ \text{ kg/m}^3$) استحکام پایین‌تر و کرنش در شکست بالاتری نسبت به فوم‌های تهیه شده با میکروبالن‌های با چگالی بالا دارند.

Zhang و همکارانش [۱۶] فوم ترکیبی رزین فنولیک/ میکروبالن کربن را تهیه کردند و خواص فشاری این فوم‌ها را مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش ابتدا میکروبالن‌های کربن را با عامل اتصال گلوئاریک دی‌آلدئید (Glutaric Dialdehyde) اصلاح کردند. شکل ۷ مقایسه‌ای بین استحکام تسلیم فشاری (σ_c) فوم‌های ترکیبی حاوی میکروبالن‌های معمولی (A) و میکروبالن‌های اصلاح شده (B) را نشان می‌دهد. نتایج حاکی از آن است که استحکام فشاری فوم‌های ترکیبی ساخته شده با میکروبالن نوع A با افزایش کسر حجمی میکروبالن کاهش می‌یابد. دلیل این کاهش می‌تواند حجم فضای خالی باشد که در اثر افزودن میکروبالن‌ها ایجاد می‌شود که این فضاها ایجاد شده منجر به کاهش σ_c می‌شود. از طرفی مشاهده می‌شود که در تمام ترکیب درصدی میکروبالن‌های نوع B، استحکام

سرعت جایگزین مواد فلزی مورد استفاده در ساختمان ماشین‌ها می‌شوند. مطالعه روی خواص ضربه کامپوزیت‌ها از زمانی که از آن‌ها در صنعت خودرو استفاده شده است اهمیت بیشتری یافته است [۲۱].

Woldesenbet [۲۲] نتیجه گرفت که بیشترین فشار وارد بر فوم‌های ترکیبی در آزمون ضربه با افزایش ضخامت دیواره میکروبالن‌ها افزایش می‌یابد. همچنین فوم‌های ترکیبی دارای میکروبالن‌های نازک‌تر در آزمون ضربه سرعت بالا، انرژی شروع ترک کمتری دارند، اما انرژی گسترش ترک آن‌ها نسبت به فوم‌های دارای میکروبالن‌های ضخیم‌تر، بیشتر است.

Kim و همکارانش [۲۳] آزمون ضربه را روی کامپوزیت‌های حاوی میکروبالن‌های اپوکسی انجام دادند و نتیجه گرفتند که کارایی ضربه کامپوزیت‌های استفاده شده به عنوان مواد محافظ با افزایش مقدار میکروبالن افزایش می‌یابد.

Woldesenbet و همکارانش [۲۴] وابستگی خواص فوم‌های ترکیبی تولید شده با میکروبالن‌های دارای ضخامت‌های متفاوت را در نرخ کرنش مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که افزایش قابل توجهی در بیشینه استحکام فوم ترکیبی در نرخ‌های کرنش بالاتر و ضخامت‌های بیشتر میکروبالن ایجاد می‌شود. همچنین مشاهده شد که مدول الاستیک نیز با افزایش نرخ کرنش و چگالی میکروبالن‌ها (ضخامت دیواره آن‌ها) افزایش می‌یابد.

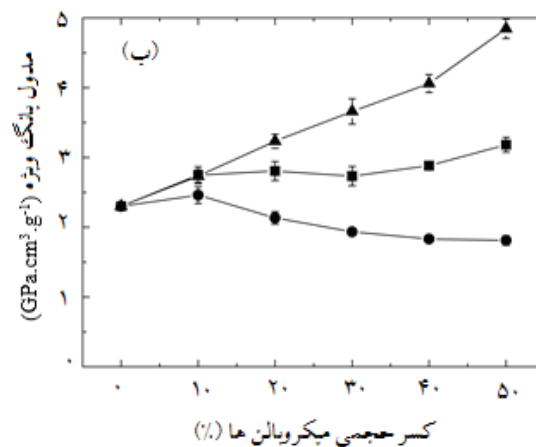
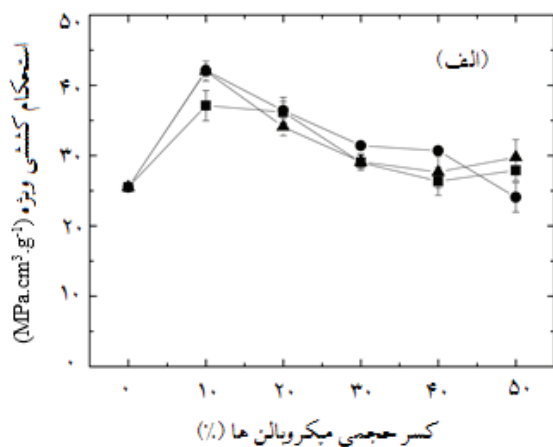
Song و همکارانش [۲۵] خواص فوم‌های ترکیبی بر پایه اپوکسی را در بازه نرخ کشش از $550 s^{-1}$ تا $1030 s^{-1}$ مورد آزمایش قرار دادند. آن‌ها مشاهده کردند که استحکام فشاری دینامیک فوم کامپوزیتی با افزایش نرخ کرنش افزایش

و تیر کوچک برشی را بر روی ساختارهای ساندویچی دارای هسته فوم ترکیبی انجام دادند. همچنین جهت بررسی اثر وضعیت انجام آزمون خمش (سه نقطه‌ای یا چهار نقطه‌ای) بر خواص خمشی، این آزمون را روی ساختارهای ساندویچی با هسته فوم ترکیبی (با کسر حجمی ثابت میکروبالن در فوم‌ها) انجام دادند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که تنش برشی ایجاد شده در هسته ساختار و همچنین تنش خمشی ایجاد شده در پوسته‌ها در هر دو وضعیت انجام آزمون خمشی، مستقل از ضخامت دیواره میکروبالن است. این گروه در بررسی نتایج آزمون تیر کوتاه برشی چنین نتیجه گرفتند که تنش برشی هسته ساختار ساندویچی و همچنین تنش خمشی وارد بر پوسته‌ها با افزایش ضخامت دیواره میکروبالن کاهش می‌یابد.

Gupta و همکارانش [۲۰] آزمون خمش سه نقطه‌ای را بر روی ساختارهای ساندویچی با هسته فوم ترکیبی و میکروبالن‌های شیشه انجام دادند. آن‌ها نتیجه گرفتند که مقدار استحکام خمشی به دست آمده به نسبت منظر (نحوه انجام آزمون از پهنا یا از لبه) وابسته است و به طور مثال، مقدار استحکام خمشی به دست آمده در نسبت منظر بزرگ‌تر، ۳۰٪ بیشتر از مقدار به دست آمده در نسبت منظر کوچک‌تر است.

۳-۲-۳ خواص ضربه و اثر نرخ کرنش بر رفتار مکانیکی فوم‌های ترکیبی

آزمون‌های شبه ایستا نیز مانند خواص دینامیکی دارای اهمیت زیادی هستند و در بررسی فوم‌های ترکیبی باید مورد مطالعه قرار گیرند، به ویژه که فوم‌های ترکیبی به



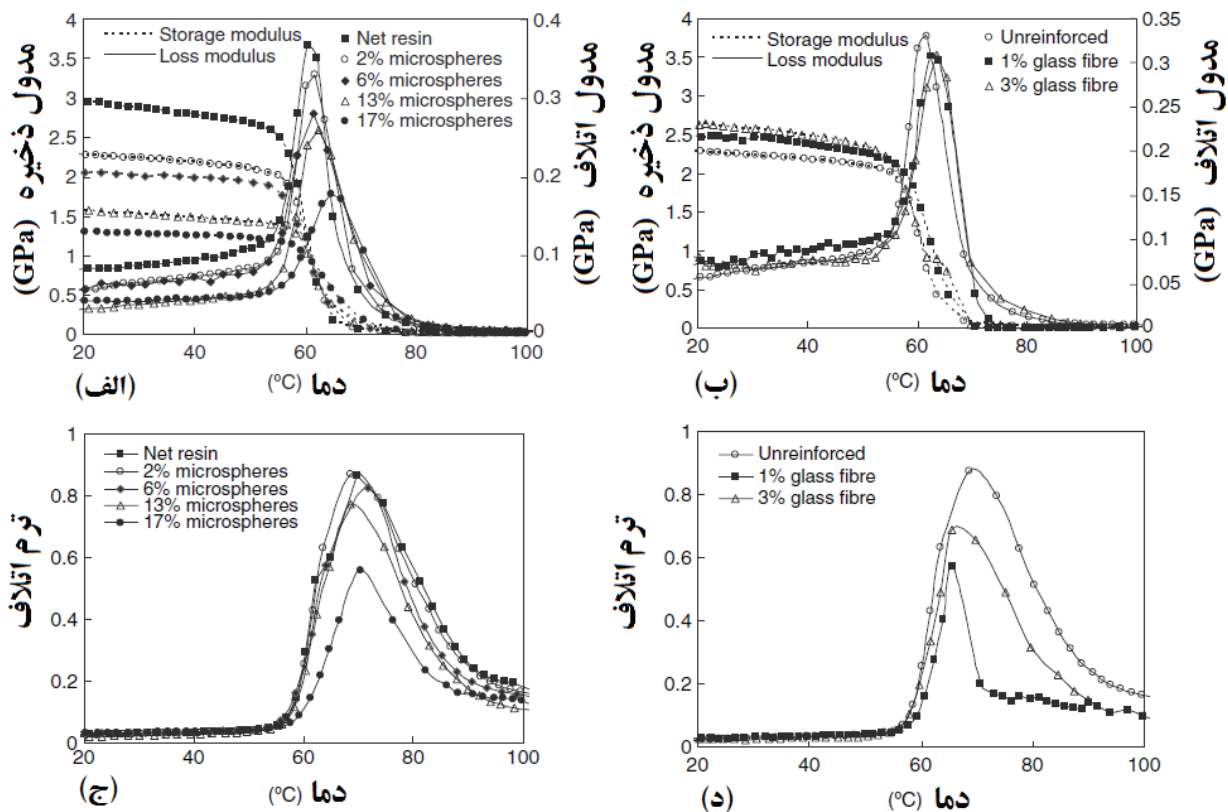
شکل ۸ خواص کششی ویژه فوم‌های ترکیبی (■) ۱۵ K، (▲) ۴۶ K، (●) میکروبالن فنولیک، الف) استحکام کششی ویژه و ب) مدول یانگ ویژه [۱۷]

می‌یابد.

۳-۳ خواص دینامیکی-مکانیکی

John و همکارانش [۲۶] فوم ترکیبی سیانات استر با میکروبالن‌های شیشه با مقادیر متغیر نانورس را تهیه کردند و خواص دینامیک-مکانیکی آن را مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاکی از آن بود که در تمام نمونه‌ها مدول ذخیره فوم ترکیبی با افزایش دما کاهش می‌یابد. همچنین افت شدیدی در مدول در نزدیکی دمای انتقال شیشه‌ای (Tg) مشاهده می‌شود. نتایج به دست آمده نشان داد که در دماهای پایین، مدول ذخیره فوم ترکیبی فاقد نانورس (CM) و فوم ترکیبی حاوی ۲ درصد حجمی نانورس (CM-2) تقریباً مشابه است. اما در نمونه حاوی ۴ درصد حجمی نانورس (CM-4) مدول ذخیره افزایش می‌یابد. بهبود مشاهده شده در نمونه CM-4 می‌تواند به علت برهم‌کنش‌های قوی بین سیانات استر و نانورس باشد که منجر به سخت‌تر شدن حرکت زنجیرهای پلیمری می‌شود.

مطالعه دیگری در زمینه فوم‌های ترکیبی DGEBA یا ناولاک که بر پایه رزین اپوکسی است با میکروبالن‌های شیشه توسط Sankaran و همکارانش [۲] انجام شد. در این تحقیق نمونه‌ها به صورت SF-01، SF-02 و SF-03 نامگذاری شدند که به ترتیب شامل ۶۲/۱۲، ۶۸/۳۳ و ۷۱/۷۰ درصد حجمی میکروبالن شیشه بودند. از طرفی نمونه SF-01 دارای سخت‌کننده آلیفاتیک (Cycloaliphatic Amine) و دو نمونه SF-02 و SF-03 دارای سخت‌کننده‌های آروماتیک (Aromatic Amine) بودند. نتایج به دست آمده از نمودار مدول اتلاف نشان داد که دمای انتقال شیشه‌ای (Tg) برای فوم‌های SF-01، SF-02 و SF-03 به ترتیب 130°C ، 151°C و $204/4^{\circ}\text{C}$ است. همچنین مشاهده شد که دمای Tg برای فوم‌های ترکیبی بیشتر از رزین خالص است که دلیل آن می‌تواند اثر تقویتی میکروبالن‌ها باشد که باعث سخت‌تر شدن حرکت زنجیرهای پلیمری در ناحیه بین سطحی ماتریس و میکروبالن می‌شود. از طرفی افزایش دمای Tg در فوم‌های ترکیبی در مقایسه با رزین‌های خالص در نمونه‌های SF-02 و SF-03 که دارای سخت‌کننده‌های آروماتیک است نسبت



شکل ۹ (الف) نمودارهای مدول ذخیره و اتلاف فوم‌هایی ترکیبی تقویت نشده و (ب) تقویت شده با الیاف شیشه (ج) اتلاف بر حسب دما برای فوم‌های تقویت نشده و (د) اتلاف بر حسب دمای فوم‌های تقویت شده با الیاف شیشه [۲۸]

مایع یونی و نانولوله‌های کربن و نیز حضور هم‌زمان هر دو ترکیب بر مقاومت الکتریکی سطحی در شکل ۱۰ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که استفاده هم‌زمان از مایعات یونی و نانولوله‌های کربنی (نمونه‌های set-1، set-2 و set-3) در مقایسه با نمونه‌های حاوی مایع یونی به تنهایی (نمونه‌های دارای کد IL) یا نانولوله کربنی به تنهایی (نمونه‌های کد CNT) و نیز نمونه شاهد (Plain) کاهش قابل ملاحظه‌ای در مقاومت الکتریکی سطحی ایجاد می‌کند.

Shunmugasamy و همکارانش [۳۱] در سال ۲۰۱۴ خواص الکتریکی فوم‌های ترکیبی بر پایه رزین وینیل استر و میکروبالن‌های شیشه را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که ثابت دی الکتریک با کاهش کسر حجمی میکروبالن‌ها و افزایش ضخامت دیواره آن‌ها افزایش می‌یابد.

مطالعات Zhu و همکارانش [۳۲] درباره خواص حرارتی و الکتریکی فوم‌های ترکیبی اپوکسی / میکروبالن شیشه نشان داد که ثابت هدایت حرارتی، ثابت دی الکتریک و اتلاف دی الکتریک فوم‌های تهیه شده با افزایش مقدار میکروبالن و کاهش چگالی آن کاهش می‌یابد که نشان دهنده این موضوع است که خواص فوم حاصله بیشتر وابسته به خواص میکروبالن‌ها است. در شکل ۱۱ نمودار ثابت هدایت حرارتی بر حسب کسر حجمی میکروبالن برای فوم‌های حاوی میکروبالن‌های متفاوت شیشه‌ای آورده شده است. مشاهدات Winkel و همکارانش [۳۳] در بررسی استحکام دی الکتریک فوم‌های ترکیبی بر پایه اپوکسی / میکروبالن شیشه نشان داد که استحکام دی الکتریک این مواد در دماهای پایین (۷۷ K) بسیار بیشتر از استحکام دی الکتریک این مواد در دمای محیط است. همچنین این گروه مشاهده کردند که سیلانیزه کردن میکروبالن‌ها سبب افزایش استحکام دی الکتریک فوم‌های حاصله در دمای محیط می‌شود.

مطالعات انجام شده در مرکز تحقیقات مواد ولتاژ بالا توسط Kessler و همکارانش [۳۴] و نیز Mashkin و همکارانش [۳۵] مربوط به تفاوت تأثیرات مربوط به نوع میدان (متناوب یا مستقیم) بر استحکام دی الکتریک و نیز توزیع میدان الکتریکی در درون فوم ترکیبی نشان داد که استحکام فوم‌های ترکیبی در میدان مستقیم بسیار بیشتر است. همچنین نتایج نشان داد که توزیع میدان الکتریکی در درون فوم ترکیبی به شدت به میزان رسانایی نسبی میکروبالن رزین وابسته است.

بررسی‌های انجام شده توسط Strauch و همکارانش [۳۶] بر روی فوم‌های ترکیبی نانوکامپوزیتی نشان داد

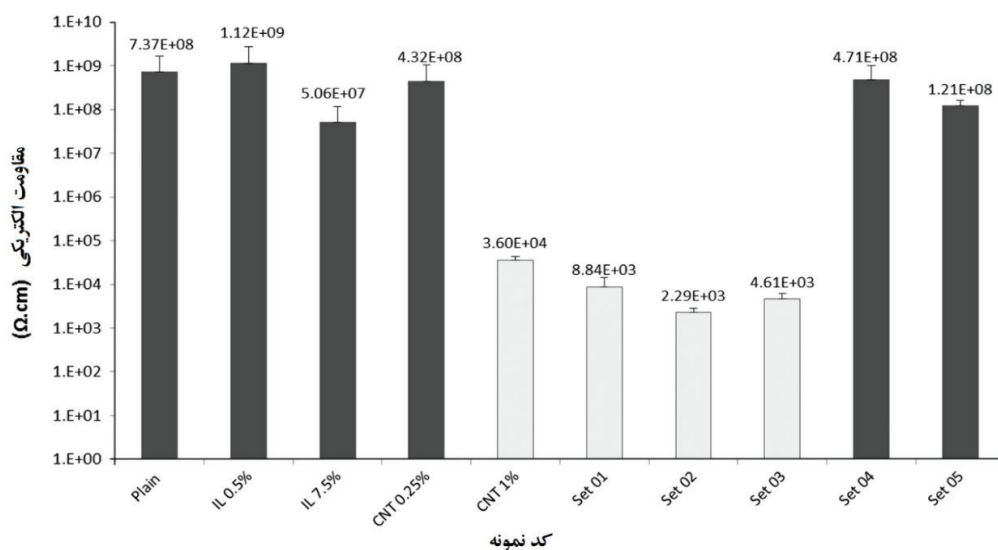
به نمونه SF-01 بیشتر است که می‌تواند به علت افزایش در کسر حجمی سخت‌کننده‌ها و کاهش میکروبالن‌ها در نمونه SF-01 نسبت به نمونه‌های SF-02 و SF-03 باشد.

Erwin و همکارانش [۲۷] تأثیر درصد الیاف کربن و اندازه الیاف بر خواص دینامیک- مکانیکی فوم‌های ترکیبی تهیه شده از رزین اپوکسی و میکروبالن‌های فنولیک را بررسی کردند. نتایج به دست آمده نشان داد که با افزایش درصد الیاف کربن و اندازه الیاف، مدول ذخیره افزایش می‌یابد. از طرفی دمای Tg در محدوده ۶۹ °C است و با افزایش درصد الیاف‌ها و اندازه الیاف، افزایش چندانی مشاهده نمی‌شود. Ferreira و همکارانش [۲۸] تأثیر کسر وزنی میکروبالن‌های و نیز الیاف شیشه را بر خواص دینامیکی مکانیکی فوم‌های ترکیبی بر پایه اپوکسی و میکروبالن‌های شیشه مورد بررسی قرار دادند. نتایج به دست آمده نشان داد با افزایش کسر وزنی میکروبالن از صفر به ۱۷٪ وزنی، مدول ذخیره و بیشینه مدول اتلاف (که مصادف با افت شدید مدول ذخیره است) کاهش قابل توجهی می‌یابند (شکل ۹). علاوه بر این، نتایج نشان داد حضور الیاف شیشه به عنوان تقویت‌کننده سبب افزایش مدول ذخیره و متعاقباً کاهش حداکثر مقدار مدول اتلاف می‌شود. روند اتلاف بر حسب دمای فوم‌های تهیه شده در شکل ۹ مشابه روند اتلاف بر حسب مدول اتلاف است و به عبارت دیگر با افزایش میزان میکروبالن و الیاف شیشه مقدار بیشینه آن کاهش می‌یابد. اگرچه نمونه حاوی سه درصد الیاف شیشه، اتلاف بالاتری از خود نشان می‌دهد که می‌تواند مربوط به وجود فضاهای خالی بیشتر در آن باشد.

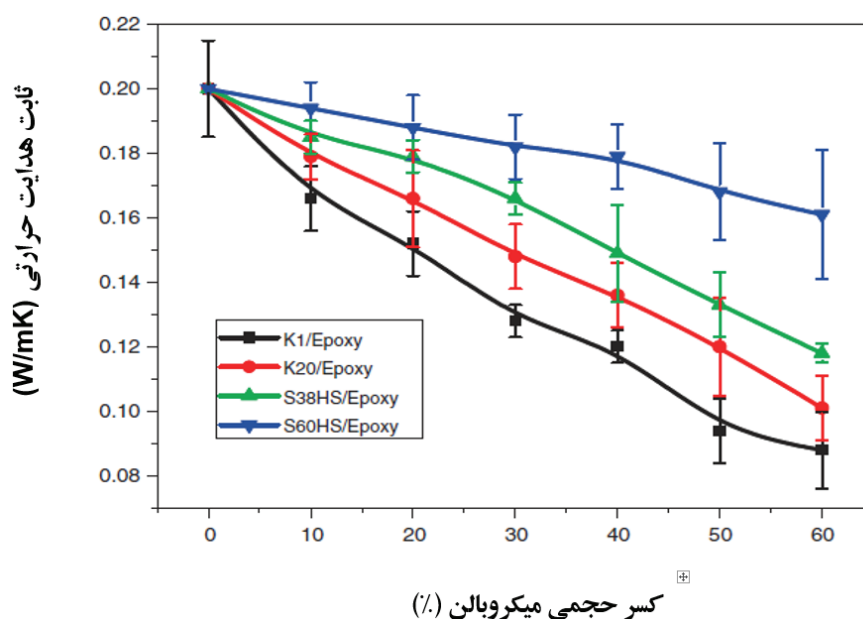
۳-۴ بررسی خواص الکتریکی و حرارتی فوم‌های ترکیبی

Zhang و همکارانش [۲۹] اقدام به تهیه فوم‌های ترکیبی هیبریدی حاوی نانو الیاف کربن نمودند و هدایت الکتریکی و بازده محافظتی این مواد را در مقابل تداخل امواج الکترومغناطیسی مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد فوم‌های ترکیبی نانوکامپوزیتی حاوی ۲٪ حجمی نانو الیاف کربن دارای خواص مناسب برای بیشتر کاربردهای عملی هستند.

قمصری و همکارانش [۳۰] در سال ۲۰۱۴ اقدام به تهیه فوم‌های بر پایه اپوکسی / میکروبالن شیشه حاوی ترکیب یونی مایع بر پایه ایمیدازولیوم کردند. نتایج نشان داد این ترکیب یونی، عاملی برای بهبود پخش نانولوله‌های کربن است و از طرفی باعث بهبود اتصال نانولوله‌های کربنی به بستر پلیمری می‌شود. مقایسه نتایج مربوط به تأثیر حضور



شکل ۱۰ مقاومت الکتریکی سطحی فوم‌های ترکیبی حاوی نانولوله‌های کربن و مایعات یونی [۳۰]



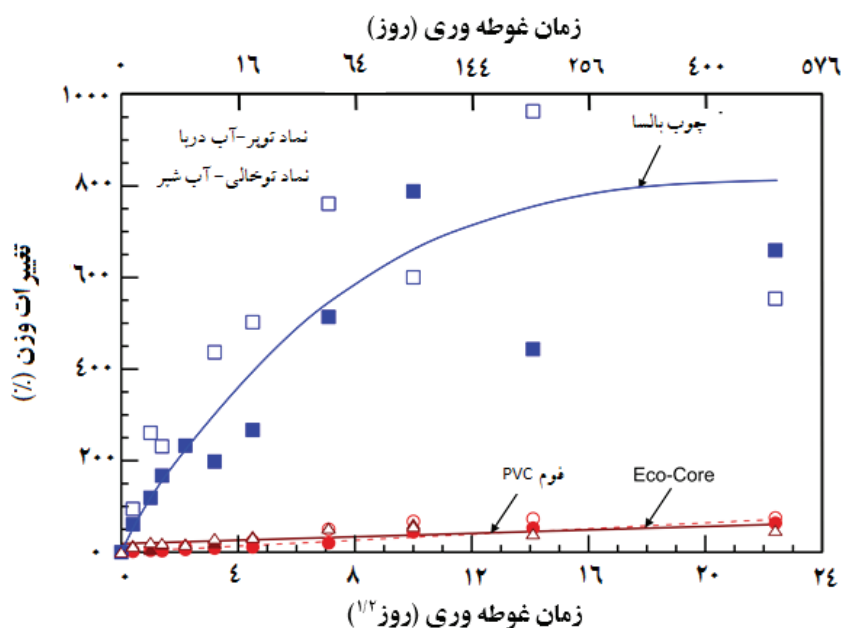
شکل ۱۱ نمودار ثابت هدایت حرارتی بر حسب درصد حجمی میکروبالن برای فوم‌های حاوی میکروبالن‌های متفاوت شیشه‌ای [۳۲]

آن‌ها است. همچنین این فوم‌ها دارای ساختار کاملاً سلول بسته هستند، از این رو مقدار آب جذب شده توسط آن‌ها بسیار کمتر از فوم‌های سلول باز است. جذب آب کلی فوم‌های ترکیبی تحت تأثیر عامل‌های فراوانی است که مهم‌ترین آن‌ها عبارت است از: ماهیت تماس بین سطحی بین ماتریس و میکروبالن، کسر حجمی میکروبالن، اندازه و مقاومت میکروبالن‌ها، خواص فیزیکی و شیمیایی پرکننده و رزین اتصال دهنده. همچنین باید توجه داشت که سطح

که افزودن میکروبالن سبب کاهش شدید ثابت هدایت حرارتی در این فوم‌ها می‌شود. همچنین مطالعات این گروه نشان داد که افزایش میزان نانوذرات سیلیکا در فوم‌های ترکیبی نانوکامپوزیتی، با افزایش جزئی ثابت هدایت حرارتی همراه است.

۳-۵ بررسی رفتار جذب آب فوم‌های ترکیبی

یکی از مهم‌ترین خواص فوم‌های ترکیبی، جذب آب پایین



شکل ۱۲ تغییرات وزنی فوم‌های ترکیبی بر حسب درصد بعد از غوطه‌وری در آب دریا و آب لوله‌کشی [۳۷]

شدیدی در استحکام فشاری نسبت به نمونه‌های خشک از خود نشان دادند.

Karthikeyan و همکارانش [۳۹] تأثیر جذب آب فوم‌های ترکیبی اپوکسی / الیاف شیشه خرد شده بر استحکام فشاری در محیط‌های آبی (آب شور یا آب دریا) و بخار آب را بررسی کردند. نتایج نشان داد که نمونه‌هایی که تحت بخار آب قرار می‌گیرند استحکام فشاری آن‌ها کاهش می‌یابد، که دلیل آن میزان جذب آب زیاد و آسیب دیدن میکروبالن‌ها و پیوندهای بین سطحی است که از طریق آزمون SEM مشاهده شد. از طرفی، استحکام فشاری نمونه‌هایی که در آب شور یا آب دریا قرار گرفتند، نسبت به نمونه‌های خشک افزایش یافت. اندازه بزرگ یون‌های کلرید و تغییرات به وجود آمده در نواحی که الیاف تحت تنش قرار دارند، دلیل افزایش استحکام فشاری ذکر شده است. Earl و همکارانش [۴۰] بر روی جذب آب فوم‌های پلیمری سلول بسته مطالعه کردند و دریافته‌اند که افزایش جرم فوم کامپوزیتی متناسب با مجذور زمان است.

۴ نتیجه‌گیری

اضافه شدن میکروبالن‌ها به رزین و تشکیل فوم‌های ترکیبی اگرچه باعث ایجاد مزایای فراوانی نظیر سبکی و نیز کاهش ثابت هدایت حرارتی و ثابت دی‌الکتریک می‌شود

تماس میکروبالن و بستر نقش مهمی در جذب آب فوم‌های ترکیبی دارد.

در مطالعه‌ای که توسط Sadler [۳۷] و همکارانش انجام شد، تأثیر سه نوع مواد Eco-Core، چوب بالسا (Balsa wood) و فوم PVC تحت غوطه‌وری در آب بررسی شد. Eco-Core ماده جدید مقاوم در برابر آتش است که ۸۳٪ وزن آن را خاکستر تشکیل می‌دهد. طراحان کشتی و هواپیما از چوب بالسا و فوم PVC به عنوان مواد هسته‌زا در ساختار ساندویچی استفاده می‌کنند. در این مطالعه تغییرات ابعادی، افزایش وزن و خواص فشاری بعد از غوطه‌وری در آب به مدت ۴ ساعت تا ۵۰۰ روز مورد بررسی قرار گرفت. مطابق شکل ۱۲ مشاهده می‌شود که Eco-Core به خوبی PVC در برابر جذب آب (آب دریا و آب لوله‌کشی) و تغییرات خواص مقاوم است. در صورتی که چوب بالسا تغییرات ابعادی و تورم زیادی را بعد از غوطه‌وری در آب نشان می‌دهد.

Gupta و همکارانش [۳۸] رفتار جذب آب و اثر آن بر خواص فشاری فوم‌های ترکیبی را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها دریافته‌اند که مدول فشاری با افزایش میزان رطوبت در فوم کاهش می‌یابد و مشاهده کردند استحکام فشاری نمونه‌های غوطه‌ور در آب، با افزایش دمای آب از ۲۵ °C به ۷۰ °C کاهش می‌یابد. نکته قابل توجه دیگر در کار این گروه آن بود که نمونه‌های در معرض آب ۷۰ °C افت

و نیز با افزایش کسر وزنی آن‌ها کاهش می‌یابد. علاوه بر این بررسی‌های دینامیکی-مکانیکی فوم‌ها نشان‌دهنده آن است که با افزایش مقدار میکروبالن‌ها مدول ذخیره و اتلاف کاهش می‌یابند. از طرفی تقویت ماتریس به کمک الیاف سبب افزایش مدول ذخیره و کاهش اتلاف می‌شود. همچنین برای بهبود خواص حرارتی و الکتریکی که در سال‌های اخیر توجه زیادی به آن شده است، افزودن نانوساختارها و نیز اصلاح خواص ماتریس با افزودنی‌های مختلف مد نظر قرار گرفته است. به عنوان مثال پوشش دادن میکروبالن‌های شیشه با نانولوله‌های کربنی سبب افزایش ۸۶٪ هدایت حرارتی این مواد شده است. از طرفی اصلاح ماتریس به کمک حضور مایعات یونی و استفاده همزمان از نانولوله‌های کربنی سبب افزایش قابل ملاحظه هدایت الکتریکی شده است. بررسی خواص جذب آب و نیز تغییر خواص فوم‌های ترکیبی در محیط مرطوب نشان داده است که میزان جذب آب و تغییر در خواص، به دمای

اما باعث افت قابل توجه استحکام به ویژه از نوع کششی در کامپوزیت حاصل می‌شود. همچنین اگرچه در بسیاری کاربردها ثابت دی الکتریک و هدایت حرارتی پایین مزیت محسوب می‌شوند اما گاهی تلفیق سبکی و نیز هدایت حرارتی یا ثابت دی الکتریک بالا مد نظر است. از این رو تلاش برای بهبود خواص مکانیکی و حرارتی و الکتریکی این مواد به طور گسترده توسط محققان مورد توجه واقع شده است. در این میان با توجه به این که خواص فوم ترکیبی، وابسته به سه عامل ماتریس، میکروبالن و سطح تماس آن‌ها است، محققان با تمرکز بر این عوامل، توانسته‌اند تا حدود زیادی خواص مطلوب دلخواه را ایجاد کنند. به عنوان مثال از تغییر کسر وزنی، چگالی، اندازه و جنس میکروبالن برای مهندسی کردن خواص مکانیکی، دینامیکی-مکانیکی و استحکام ضربه‌ای این فوم‌ها استفاده شده است. نتایج بیانگر آن است که خواص مکانیکی و نیز استحکام ضربه‌ای این فوم‌ها با افزایش چگالی میکروبالن‌ها افزایش

مراجع

1. John B., Nair R.C.P., "Update on Syntactic Foams", iSMITHERS, UK, 1-30, **2010**.
2. Sankaran S., Sekhar K.R., Raju G., Kumar M.N.J., Characterization of Epoxy Syntactic Foams by Dynamic Mechanical Analysis, *J. Mater. Sci.*, 41, 4041-4046, **2006**.
3. Beigi Boroujeni S., Atai M., Nodehi A., Preparation of Polymeric Hollow Microsphere, *MSc Thesis, Iran Polymer and Petrochemical Institute*, September, **2009**.
4. Gupta N., Sankaran S., On the Characterization of Syntactic Foam Core Sandwich Composites for Compressive Properties, *J. Reinf. Plast. Comp.*, 18, 1347-1357, **1999**.
5. Woldesenbet E., Gupta N., Jerro H.D., Effect of Microballoon Radius Ratio on Syntactic Foam Core Sandwich Composites, *J. Sandw Struct. Mater.*, 7, 95-111, **2005**.
6. Gupta N., Ricci W., Comparison of Compressive Properties of Layered Syntactic Foams Having Gradient in Microballoon Volume Fraction and Wall Thickness, *Mater. Sci. Eng.*, 427, 331-342, **2006**.
7. Gupta N., A Functionally Graded Syntactic Foam Material for High Energy Absorption under Compression, *Mater. Lett.*, 61, 979-982, **2007**.
8. Li G., Muthyala V.D., A Cement Based Syntactic Foam, *Mater. Sci. Eng.*, 478, 77-86, **2008**.
9. Yu M., Zho P., Ma Y., Effects of Particle Clustering on the Tensile Properties and Failure Mechanisms of Hollow Spheres Filled Syntactic Foams: A Numerical Investigation by Microstructure Based Modeling, *Materials and Design*, 47, 80-89, **2012**.
10. Zhang L., Ma J., Effect of Carbon Nanofiber Reinforcement on Mechanical Properties of Syntactic Foam, *Mater. Sci. Eng.*, 574, 191-196, **2013**.
11. Li X., Zhu M., Tang X., Zhang Q., Yang X., Sui G., Influence of Hollow Carbon Microspheres of Micro and Nano-Scale on the Physical and Mechanical Properties of Epoxy Syntactic Foams. *RSC Advances*, 63, 50919-50928, **2015**.
12. Bhat P., Zegeye E., Ghamsari A.K., Woldesenbet E., Improved Thermal Conductivity in Carbon Nanotubes-Reinforced Syntactic Foam Achieved by a New Dispersing Technique, *JOM*, 67, 2848-2855, **2015**.
13. Bunn P., Mottram J.T., Manufacturing and Compression Properties of Syntactic Foams, *Composites*, 24, 565-571, **1993**.
14. Gupta N., Mensah P., Compression Properties of Syntactic Foam: Effect of Cenosphere Radius Ratio and Specimen Aspect Ratio, *Compos. Part A*, 35, 103-111, **2004**.
15. Gupta N., Maharsia R., Enhancement of Energy Absorption in Syntactic Foams by Nanoclay Incorporation for Sandwich Core Applications, *Appl. Compos. Mater.*, 12, 247-261, **2005**.
16. Zhang L., Maa J., Effect of Coupling Agent on Mechanical Properties of Hollow Carbon Microsphere/Phenolic Resin Syntactic Foam, *Compos. Sci. Technol.*, 70, 1265-1271, **2010**.
17. Wouterson E.M., Boey F.Y.C., Hu X., Wong S-C., Specific Properties and Fracture Toughness of Syntactic Foam: Effect of Foam Microstructures, *Compos. Sci. Technol.*, **65**, 1840-1850, 2005.
18. Gupta N., Nagorny R., Tensile Properties of Glass Microballoon-Epoxy Resin Syntactic Foams, *J. Appl. Polym. Sci.*, 102, 1254-1261, **2006**.
19. Gupta N., Woldesenbet E., Characterization of Flexural Properties of Syntactic Foam Core Sandwich Composites and Effect of Density Variation, *J. Compos. Mater.*, 39, 2197-2212, **2005**.
20. Gupta N., Woldesenbet E., Sankaran S., Response of Syntactic Foam Core Sandwich Structure Composites to Three-Point Bending, *J. Sandw Struct. Mater.*, 4, 249-272, **2002**.
21. Cheon S.S., Lee D.G., Development of the Composite Bumper Beam for Passenger Cars. *Compos. Struct.*, 32, 491-499, **1995**.
22. Woldesenbet E., Low Velocity Impact Properties of Nanoparticulate Syntactic Foams, *Mater. Sci. Eng.*, 496,

217-222, **2008**.

23. Kim H.S., Khamis M.A., Fracture and Impact Behaviors of Hollow Microsphere/Epoxy Resin Composites, *Compos. Part A*, 32, 1311-1317, **2001**.

24. Woldesenbet E., Jadhav A., Effect of Density and Strain Rate on Properties of Syntactic Foams, *J. Mater. Sci.*, 40, 4009-4017, **2005**.

25. Song B., Frew D.J., Dynamic Compressive Response and Failure Behavior of an Epoxy Syntactic Foam, *J. Compos. Mater.*, 38, 915-936, **2004**.

26. John B., Naira C.P.R., Ninan K.N., Effect of Nanoclay on the Mechanical, Dynamic Mechanical and Thermal Properties of Cyanate Ester Syntactic Foams, *Mater. Sci. Eng.*, 527, 5435-5443, **2010**.

27. Erwin M.W., Freddy Y.C.B., Hu X., Wong S-C., Effect of Fiber Reinforcement on the Tensile, Fracture and Thermal Properties of Syntactic Foam, *Polymer*, 48, 3183-3191, **2007**.

28. Ferreira J. A. M., Capela C., Costa J. D., Dynamic Mechanical Analysis of Hybrid Fibre/Glass Microspheres Composites, *Strain*, 47, 275-280, **2011**.

29. Zhang L., Wang L.B., See K.Y., Effect of Carbon Nanofiber Reinforcement on Electromagnetic Interference Shielding Effectiveness of Syntactic Foam, *J. Mater. Sci.*, 48, 7757-7763, **2013**.

30. Ghamsari A.K., Wicker S., Woldesenbet E., Bucky Syntactic Foam; Multi-Functional Composite Utilizing Carbon Nanotubes-Ionic Liquid Hybrid, *Compos. Part B*, 67, 1-8, **2014**.

31. Chakravarthy Shunmugasamy V., Gupta N., Pinisetty D., Electrical Properties of Hollow Glass Particle Filled Vinyl Ester Matrix Syntactic Foams, *J. Mater. Sci.*, 49, 180-190, **2014**.

32. Zhu B., Ma J., Wang J., Wu J., Peng D., Thermal, Dielectric and Compressive Properties of Hollow Glass Microsphere Filled Epoxy-Matrix composites, *J. Reinf. Plast. Comp.*, 31, 1311-1326, **2012**.

33. Winkel D., Puffer R., Schnettler A., Investigation of the Breakdown Process of Syntactic Foam under Lightning Impulse Stress at Liquid Nitrogen Temperature, *IEEE T. Dielect. El. In.*, 22, 1134-1141, **2015**.

34. Kessler M., Troeger A., Heil B., Schnettler A., Investigation of the Electrical Properties of Elastic Syntactic Foam, *IEEE T. Dielect. El. In.*, 978, 261-264, **2008**.

35. Mashkin A., Strauchs A., Schnettler A., Effects of SiO₂ Nanofiller on the Properties of Epoxy Resin Based Syntactic Foam, *IEEE T. Dielect. El. In.*, 19, 400-407, **2012**.

36. Strauchs A., Mashkin A., Schnettler A., The Impact of Electrical Field Stress on the Volume Conductivity of Syntactic Foam, *IEEE T. Dielect. El. In.*, 978, 5-10, **2010**.

37. Sadler R.L., Sharpe M., Panduranga R., Shivakumar K., Water Immersion Effect on Swelling and Compression Properties of Eco-Core, PVC Foam and Balsa Wood, *Compos. Struct.*, 90, 330-336, **2009**.

38. Gupta N., Woldesenbet E., Hygrothermal Studies on Syntactic Foams and Compressive Strength Determination, *Compos. Struct.*, 61, 311-320, **2003**.

39. Karthikeyan C.S., Sankaran S., Effect of Absorption in Aqueous and Hygrothermal Media on the Compressive Properties of Glass Fiber Reinforced Syntactic Foam, *J. Reinf. Plast. Comp.*, 20, 982-993, **2015**.

40. Earl J.S., Sheno R.A., Determination of Moisture Uptake Mechanism in Closed Cell Polymeric Structural Foam During Hygrothermal Exposure, *J. Compos. Mater.*, 38, 1345-1365, **2004**.