



## بررسی تأثیر درصد حجمی و اندازه میکروبالن بر خواص فشاری فوم‌های ترکیبی اپوکسی/میکروبالن سرامیکی

حامد احمدی<sup>1</sup>، غلامحسین لیاقت<sup>2\*</sup>، محمود مهرداد شکرپیه<sup>3</sup>

1- دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران  
2- استاد مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران  
3- استاد مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت، تهران  
\* تهران، صندوق پستی 143-14115، ghlia530@modares.ac.ir

### چکیده

فوم‌های ترکیبی اپوکسی/میکروبالن سرامیکی به دلیل داشتن مقاومت مخصوص مناسب و قابلیت جذب انرژی بالا در بسیاری از سازه‌های دریایی یا اتومبیل‌ها کاربرد دارند. در این تحقیق یک سری اپوکسی خالص و 9 سری فوم با سه نوع میکروبالن در اندازه و استحکام متفاوت و در سه درصد حجمی 20%، 40% و 60% ساخته شده و تأثیر این متغیرها روی خواص نهایی فوم در فشار مورد بررسی قرار گرفته است. علاوه بر این موارد نرخ بارگذاری فشاری نیز در رفتار فوم بررسی شده است. تمامی 10 سری نمونه در سه نرخ کرنش 1-10، 2-10 و 3-10 تحت آزمایش قرار گرفتند. نتایج آزمون‌ها نشان می‌دهند که با افزایش سرعت بارگذاری، تنش حداکثری شکست در فوم افزایش می‌یابد. البته این افزایش مقاومت با افزایش درصد حجمی میکروبالن کمتر خواهد شد. همچنین نتایج نشان می‌دهند که هر چه میکروبالن‌ها بزرگ‌تر باشند، فوم در فشار ضعیف‌تر است. البته هر چه درصد حجمی فوم ترکیبی کمتر باشد، تأثیر این عامل نیز بیشتر خواهد بود. در طرف مقابل هر چه درصد حجمی فوم بیشتر باشد، فاکتور استحکام میکروبالن تأثیرگذارتر است. این تأثیرگذاری در میزان تنش پلاتو و انرژی جذب شده در حین فرایند فشار کاملاً محسوس است. با افزایش نرخ کرنش مقاومت فوم به شکل محسوس و مدول الاستیسیته نیز خیلی جزئی افزایش می‌یابند.

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل  
دریافت: 28 اردیبهشت 1392  
پذیرش: 29 خرداد 1392  
ارائه در سایت: 10 خرداد 1393

کلید واژگان:

فوم ترکیبی  
اپوکسی  
میکروبالن سرامیکی  
خواص فشاری  
نرخ بارگذاری

## Volume fraction and microballoon size effects on the compressive properties of epoxy/ceramic microballoon syntactic foam

Hamed Ahmadi<sup>1</sup>, Gholamhossein Liaghat<sup>1\*</sup>, Mahmoud Mehrdad Shokrieh<sup>2</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.  
2- Department of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran  
\*P.O.B. 14115-141 Tehran, Iran, ghlia530@modares.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 18 May 2013  
Accepted 19 June 2013  
Available Online 31 May 2014

**Keywords:**  
Syntactic foam  
Epoxy  
Ceramic Microballoon  
Compressive Properties  
Loading Rate

### ABSTRACT

Epoxy / ceramic micro balloon syntactic foams are used in marine and automobile industries because of their high specific strength and capability of absorbing energy. In this paper, the neat epoxy and 9 series of syntactic foams with 3 kinds of ceramic micro balloon with different diameters and crush strength in different volume fractions (20%, 40% & 60%) were fabricated. Effect of varying these parameters on the mechanical properties of syntactic foams is investigated. Besides of all, the effect of different loading rate is investigated, too. All of the samples were tested in  $10^{-1}$ ,  $10^{-2}$  and  $10^{-3}$  strain rates. The results indicate that with increasing the strain rate from quasi-static to moderate rates, the strength of foams became more. Also the results show that the syntactic foam with bigger micro balloon was weak in compression. In syntactic foams of low volume fraction the size effects is more. On the other hand, with increasing the volume fraction, the crush strength of micro balloon is become effective. Plateau stress and absorbed energy results show these facts obviously. With increasing the strain rate, the strength is increased considerably.

خواص فیزیکی همسانگرد<sup>2</sup>، استحکام و مدول فشاری مخصوص زیاد، جذب رطوبت بسیار پایین و پایداری گرمایی بالا، این مواد کاندیدای مناسبی برای استفاده در سازه‌های سبک مانند هواپیما، زیردریایی‌ها و غیره می‌باشند [2].

2- Isotropic

### 1- مقدمه

فوم‌های ترکیبی کامپوزیت‌های متشکل از مواد بسیار کوچک توخالی به نام میکروبالن<sup>1</sup> و ماتریس فلزی، سرامیکی یا پلیمری می‌باشند [1]. با توجه به

1- Microballoon

### Please cite this article using:

H. Ahmadi, Gh.H. Liaghat, M. Mehrdad Shokrieh, Volume fraction and microballoon size effects on the compressive properties of epoxy/ceramic microballoon syntactic foam, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 4, pp. 37-44, 2014 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:



شکل 1 نمونه تحت آزمایش فشار

جدول 1 خواص میکروبالن‌ها

نوع میکروبالن	قطر میکروبالن (μm)	نسبت ضخامت-استحکام فشاری چگالی موثر (MPa)	به قطر (%)	نوع میکروبالن
WM	170	25	~ 10	0/7
SG	130	14	~ 10	0/7
W150	80	25	~ 10	0/7

برای جزء پلیمری از اپوکسی با نام تجاری اپیکوت 828<sup>4</sup> از شرکت رزولوشن<sup>5</sup> و هاردنر با نام تجاری تری‌اتیلن‌تتر‌آمین<sup>6</sup> (تتا<sup>7</sup>) از خانواده هاردنرهای آمینی از شرکت آکزئوبل<sup>8</sup> با درصد ترکیبی 10:1 استفاده شده است. اپی کوت 828 رزینی از خانواده اپوکسی با گرانبوی متوسط متشکل از بیسفنول A و اپی کلروهیدرین می‌باشد. چگالی ترکیب این دو جزء با همان رزین خالص طبق استاندارد ASTM C271 محاسبه شده و میزان این چگالی 1/18 گرم بر سانتی‌متر مکعب می‌باشد.

برای ساخت و ترکیب اجزای فوم ترکیبی روش‌های مکانیکی ساده ولی مختلف در آثار محققان به چشم می‌خورد. بنابر یافته‌های قبلی نگارندگان این مقاله [13]، بهترین روش برای ساخت فوم‌های ترکیبی با درصد حجمی 40% (میزان حجمی که میکروبالن‌ها در فضای کل فوم اشغال کرده اند به کل فضای فوم به عنوان درصد حجمی میکروبالن در فوم عنوان می‌شود) و کمتر به این صورت است که ابتدا اختلاط رزین و میکروبالن با همزن سرعت بالا انجام شده و پس از افزودن هاردنر، ترکیب نهایی به مدت 45 دقیقه (نصف مدت زمان ژل شدن) به صورت دستی و با سرعت پایین مخلوط می‌شود تا به شکل خمیری درآید. محصول خمیری نهایی بدون اعمال فشار یا خلأ قالب‌گیری می‌شود. با استفاده از این روش فوم‌های 20% و 40% با سه نوع میکروبالن ساخته شدند. برای تولید فوم با درصد حجمی 60% رزین و میکروبالن ابتدا با همزن سرعت بالا و سپس با افزایش میکروبالن به صورت دستی مخلوط می‌شوند. سپس هاردنر به مجموعه اضافه شده و پس از حباززدایی در آن خلأ قالب‌گیری صورت می‌گیرد [13]. برای ساخت نمونه-های آزمایش فشار از چند قالب سیلیکونی با ابعاد 25mm (l) × 14.7mm (Ø) استفاده شده است.

تمامی قطعات پس از 24 ساعت در دمای 25 درجه سانتی‌گراد پخت شده و پس از گذشت یک هفته آماده آزمایش می‌گردند. قبل از آزمایش

در بیشتر موارد فوم‌های ترکیبی با استفاده از رزین‌های پلیمری به عنوان ماتریس ساخته می‌شوند. این گونه فوم‌ها به عنوان هسته پانل‌های ساندویچی علاوه بر مزیت پایداری ابعادی، قابلیت جذب انرژی این پانل‌ها را نیز افزایش می‌دهند [3]. در واقع این توانایی که با ترکیب دو جزء با نسبت‌های مناسب به خصوصیات مورد نیاز در ماده نهایی دست یافته شود، این مواد را بسیار جذاب کرده است. از این رو محققان بسیاری تحقیقاتشان را بر روی این مواد متمرکز کرده‌اند. بیشتر این تحقیقات بر روی فوم‌های ترکیبی با میکروبالن‌های شیشه‌ای است. به طور مثال تحقیقاتی بر روی فوم‌های ترکیبی با میکروبالن‌های شیشه‌ای صورت گرفته تا حداکثر درصد حجمی میکروبالن‌ها در ماتریس که در آن مقاومت یا جذب انرژی مخصوص<sup>1</sup> (مقاومت نسبت به وزن) حداکثر باشد، بدست آید [4،5].

در بسیاری موارد تأثیر تغییر درصد حجمی میکروبالن در خواص مکانیکی فوم‌های ترکیبی و همچنین تأثیر اندازه ضخامت دیواره میکروبالن نیز مورد بررسی قرار گرفته‌اند [6-8]. در چند مورد محدود نیز از میکروبالن‌های پلیمری در تحقیقات استفاده شده است [9]. در این میان فوم‌های ترکیبی با میکروبالن‌های سرامیکی کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. میکروبالن‌های سرامیکی اگر چه چگالی بالاتری نسبت به میکروبالن‌های شیشه‌ای دارند ولی از نظر خواص مکانیکی مقاومت بالاتری دارند [10]. به عنوان مثال فوم ترکیبی میکروبالن سرامیکی / ماتریس پلی‌یورتان در بدنه اتومبیل‌ها برای جذب انرژی بیشتر ضربات استفاده می‌شود [11]. رزین اپوکسی که به عنوان ماتریس در بسیاری از فوم‌های ترکیبی استفاده می‌شود، خواص قابل ملاحظه‌ای دارد که سبب شده اکثر محققان در آزمایش‌های خود از آن بهره ببرند. از جمله این خواص می‌توان به استحکام بالا، انقباض حجمی کم پس از پخت، چسبندگی مناسب به اکثر سطوح، عایق مناسب الکتریکی، خنثی و مقاوم در برابر اکثر حلال‌ها و مواد شیمیایی، هزینه پایین و اثرات سمی اندک اشاره کرد. از نظر کاربرد و ساخت نیز بسیار کارآمد و آسان است. ترکیب میکروبالن سرامیکی و اپوکسی به ندرت مورد بررسی قرار گرفته است. از جمله موارد محدود می‌توان به پژوهشی بر روی خواص کششی این فوم ترکیبی و مدل‌سازی آن اشاره نمود [12].

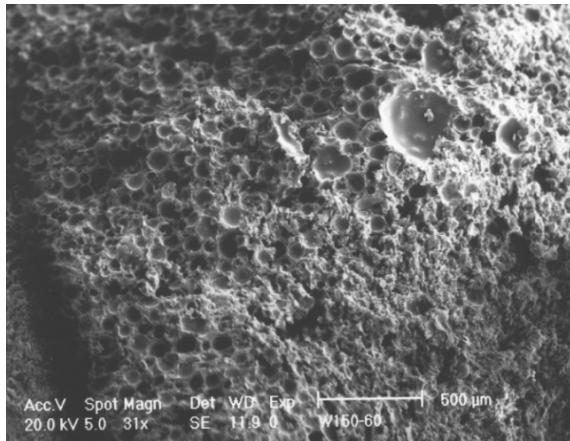
در این تحقیق بر روی خواص مکانیکی و ظرفیت جذب انرژی فوم‌های ترکیبی اپوکسی/میکروبالن سرامیکی در فشار با چند نرخ بارگذاری متفاوت مورد بحث و بررسی قرار گرفته‌اند. خواص مکانیکی فوم‌ها بر حسب میزان درصد حجمی میکروبالن‌ها در ماتریس اپوکسی و اندازه و استحکام فشاری<sup>2</sup> آنها بدست آمده و مکانیزم‌های تخریبی که جذب انرژی به وسیله آنها صورت می‌گیرد، در این نوع بارگذاری بررسی شده است.

## 2- مواد، تجهیزات و روش ساخت

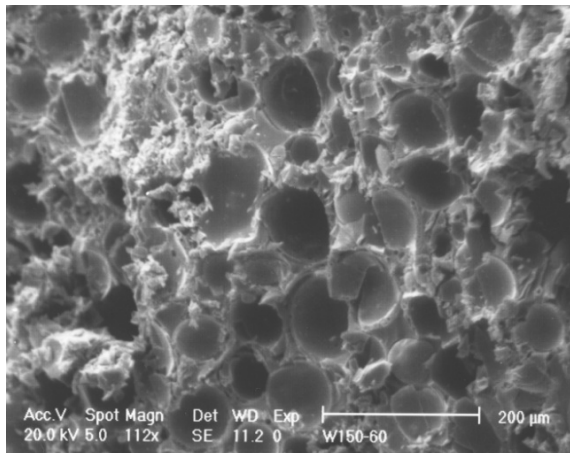
برای ساخت نمونه‌های فوم ترکیبی از سه نوع میکروبالن با نام‌های تجاری SG، WM و W150 ساخت شرکت آلمانی آمگامینرال<sup>3</sup> استفاده شده است. جدول 1 بعضی از خواص این میکروبالن‌ها را نشان می‌دهد. میکروبالن SG دارای استحکام فشاری کمتری نسبت به دو نوع دیگر است. همچنین هر سه میکروبالن از نظر اندازه با هم متفاوت هستند. در این مقاله سعی شده است تا با مقایسه میکروبالن‌ها اثرات اندازه قطر و استحکام فشاری آنها بر خواص فشاری فوم ترکیبی مورد آزمون قرار گیرد.

4- EPIKOTE 828  
5- RESOLUTION  
6- Triethylenetetramine  
7- TETA  
8- AkzoNobel

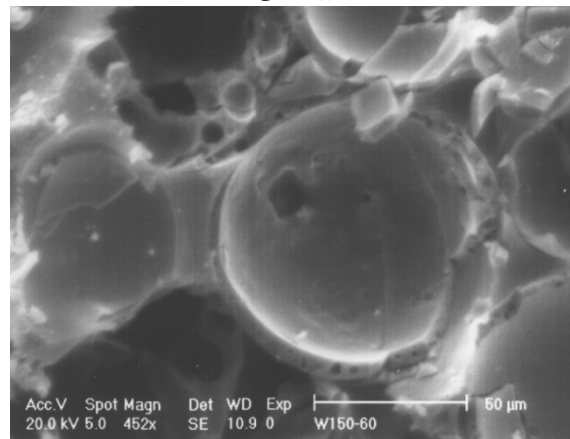
1- Specific Absorbed Energy  
2- Crush Strength  
3- OmegaMineral Ltd. Co.



الف- بزرگ‌نمایی 31x



ب- بزرگ‌نمایی 112x



ج- بزرگ‌نمایی 452x

شکل 2 تصاویر SEM از سطح شکسته شده فوم

### 3-2- ریزساختار فوم

برای بررسی ریزساختار فوم آزمایش شده با استفاده از میکروسکوپ الکترونی فیلیپس<sup>1</sup> موجود در دانشکده فنی دانشگاه تربیت مدرس از سطح شکست نمونه‌ها عکس SEM تهیه شد. شکل 2 سه دورنمای متفاوت از سطح شکست فوم با صد حجمی 60% را نشان می‌دهد. ساختار فومی و پر از حباب این ماده در شکل 2- الف کاملاً مشهود است. به دلیل بارگذاری تا کرنش 0/7، اکثر میکروبالن‌های سطح شکست خرد شده‌اند. سطوح شکست در دیواره میکروبالن در شکل 2- ج دیده می‌شود. لازم به ذکر است عدم مشاهده تجمع

نمونه‌ها تحت ماشین‌کاری قرار گرفته تا ابعاد به اندازه 15mm طول آماده شوند. آزمایش فشار با استفاده از استاندارد ASTM C365 و در سه نرخ کرنش  $10^{-1}$ ،  $10^{-2}$  و  $10^{-3}$  انجام شده است. مطابق با استاندارد هر آزمایش 3 بار تکرار شده است. برای انجام آزمایش از یک دستگاه یونیورسال کشش و فشار استفاده شده است. شکل 1 نمونه فوم را در دستگاه آزمایش نشان می‌دهد.

تمامی نمونه‌ها قبل از آزمایش مورد آزمون ابعادی قرار گرفته و با استفاده از استاندارد ASTM C271 چگالی آنها بدست آمده است.

### 3- نتایج و بحث روی آنها

#### 3-1- خواص فیزیکی

چگالی فوم‌های ساخته شده را می‌توان با استفاده از رابطه تئوری (1) محاسبه کرد [14].

$$\rho_{th} = \phi \rho_{mb} + (1 - \phi) \rho_m \quad (1)$$

در این رابطه  $\rho_{th}$  چگالی فوم ترکیبی،  $\phi$  درصد حجمی میکروبالن در فوم،  $\rho_{mb}$  چگالی موثر میکروبالن و  $\rho_m$  چگالی رزین اپوکسی می‌باشد.

به دلیل اختلاط مکانیکی اجزا در حین ساخت، وجود حباب هوا در ساختار فوم اجتناب‌ناپذیر است. مخصوصاً هنگامی که درصد حجمی میکروبالن در ماتریس افزایش پیدا کند. از این رو هیچ وقت چگالی واقعی فوم با چگالی تئوری آن یکسان نخواهد بود. اختلاف این مقادیر از طریق رابطه (2) به عنوان حباب هوایی است که به صورت ناخواسته در ماتریس اپوکسی گیر کرده است [13].

$$\phi_p = 1 - \frac{\rho_{exp}}{\rho_{th}} \quad (2)$$

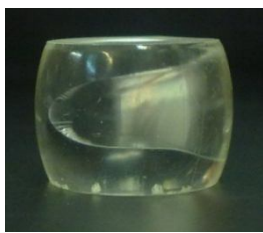
در این رابطه  $\phi_p$  نسبت تخلخل،  $\rho_{exp}$  چگالی واقعی اندازه‌گیری شده است و  $\rho_{th}$  چگالی تئوری محاسبه شده از رابطه 1 است.

جدول 2 خصوصیات فیزیکی اپوکسی خالص و فوم‌ها، همراه با میزان حباب هوای ناخواسته را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، حباب هوای ناخواسته در درصدهای بالای حجمی به شکل فزاینده‌ای افزایش می‌یابد. علت اصلی این پدیده را می‌توان در ویسکوزیته بسیار بالای ترکیب در درصدهای بالای 50% دانست. جایی که مخلوط به شکل خمیری است. در هر حال اگر چه وجود این حباب‌های ناخواسته به طور حتم از میزان مقاومت فوم می‌کاهد، در عین حال از بین بردن کامل آن نیز تقریباً غیرممکن است.

جدول 2 خصوصیات فیزیکی اپوکسی و فوم

نوع فوم	درصد حجمی (%)	چگالی واقعی (gr/cm <sup>3</sup> )	میزان حباب (%)
اپوکسی خالص	0	1/185	0/0
فوم WM	20	1/062	2/4
فوم WM	40	0/962	3/0
فوم WM	60	0/806	10/0
فوم SG	20	1/068	2/0
فوم SG	40	0/969	2/2
فوم SG	60	0/795	11/0
فوم W150	20	1/046	3/8
فوم W150	40	0/954	3/7
فوم W150	60	0/810	9/4

1- PHILIPS



شکل 5 تغییر شکل بشکلهای رزین پس از شکست اولیه



شکل 6 تغییر شکل فوم در ناحیه پلاتو و عدم بشکلهای شدن به همراه رشد ترک‌های 45°



شکل 7 نمونه قبل و بعد از تست (دو مخروط ناقص روی هم بر اثر رشد ترک‌های 45°)

در فوم‌ها این رفتار تا حدودی متفاوت است. با افزایش میزان بارگذاری، فشار بر روی میکروبالن‌ها زیاد شده و باعث شکسته شدن آنها می‌شود. از این رو فضای داخلی میکروبالن که حالا قابل دسترسی است می‌تواند توسط مواد اپوکسی پر شده و از این طریق حرکت مواد رزینی و فشرده شدن آنها تسهیل می‌گردد. شکل 6 تغییر شکل فوم تا ناحیه دوم را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، بشکلهای شدن به هیچ عنوان دیده نمی‌شود. ترک‌های زیادی روی دیواره و در داخل فوم با زاویه 45° گسترش یافته؛ از این رو نسبت به رزین خالص امکان حرکت عرضی بیشتری به فوم داده می‌شود. در نتیجه تنش مانند نمودار رزین خالص افزایش نمی‌یابد. این وضعیت تا جایی ادامه پیدا می‌کند که میزان قابل توجهی میکروبالن شکسته شده و دیگر فضایی برای حرکت و فشرده شدن مواد رزینی نباشد. در این حالت ترک‌ها تا عمق ماده نفوذ یافته و سبب جدا شدن مواد اطراف نمونه شده و آنچه باقی می‌ماند شبیه دو مخروط است که از نوک به هم متصل بوده و فشرده می‌شوند (شکل 7). از این نقطه به بعد ناحیه سوم شروع می‌شود که مواد بیشتر از پیش فشرده شده و تنش به شکل فزاینده‌ای افزایش می‌یابد.

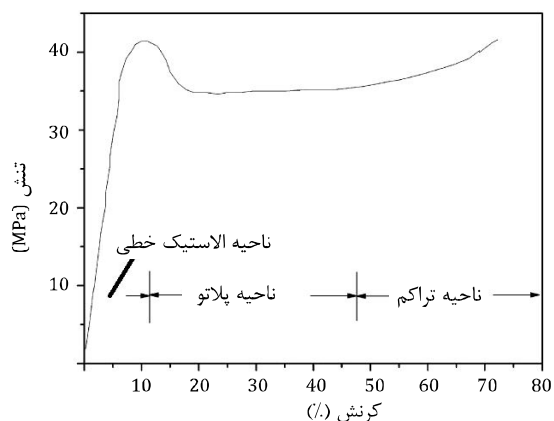
با توجه به نمودار، تنش حداکثر و کرنش مربوط به آن در انتهای ناحیه الاستیک خطی، مدول ناحیه الاستیک، تنش پلاتو و انرژی جذب شده (سطح زیر منحنی نمودار نیرو - جابجایی) در حین ناحیه اول و دوم به عنوان معیارهای مقایسه بین فوم‌ها تعیین شده‌اند. تنش پلاتو به عنوان معیاری از توانایی یک فوم در جذب انرژی شناخته می‌شود. از آنجا که بیشترین قسمت نمودار تنش-کرنش متعلق به این ناحیه است، تنش متعلق به آن یکی از ابزارها و معیارهای مقایسه بین انواع مختلف فوم‌ها می‌باشد. نتایج نشان می‌دهند که عموم فوم‌ها بعد از تسلیم اولیه که در کرنشی بین 3/5 تا 5 درصد رخ می‌دهد، به طور میانگین شروع ناحیه پلاتو بین 5 تا 10 درصد کرنش و خاتمه آن بین 50 تا 60 درصد است. از اینرو تنش میانگین نقاط

میکروبالن‌ها بدون رزین، نشان‌دهنده پراکندگی مناسب آنها در ماتریس می‌باشد. در عکس‌های SEM مشاهده می‌شود که سطح ترک شامل سطوح شکسته شده ماتریس و میکروبالن است. در سطح شکست میکروبالن سالم به ندرت یافت می‌شود که نشان می‌دهد ترک از مرز بین میکروبالن و ماتریس عبور نکرده است. این موضوع مؤید آن است که اتصال بین میکروبالن و ماتریس به خوبی برقرار شده و اتصال ضعیفی نیست.

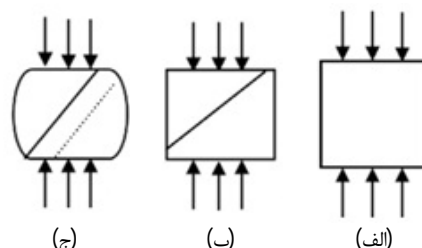
### 3-2- خواص مکانیکی

شکل 3 نمودار معمولی تنش - کرنش یک فوم ترکیبی در فشار را نشان می‌دهد. این نمودار را در راستای محور کرنش می‌توان به سه ناحیه تقسیم‌بندی کرد. الف) ناحیه الاستیک خطی ب) ناحیه تنش ثابت یا پلاتو<sup>1</sup> ج) ناحیه متراکم شدن<sup>2</sup>.

در اولین ناحیه ماده تحت فشار تغییر شکل یکنواخت و خطی دارد که سبب ایجاد یک ناحیه الاستیک خطی می‌شود. در انتهای این ناحیه تنش به مقدار حداکثری می‌رسد. بعد از این مقدار حداکثری افت ناگهانی در تنش رخ می‌دهد. این افت ناشی از بوجود آمدن ترکی در ماتریس است. این پدیده را می‌توان در تمامی فوم‌ها و حتی رزین خالص نیز مشاهده کرد. در ناحیه دوم تنش تقریباً ثابت است. این ناحیه تفاوت اصلی نمودار فوم با رزین خالص می‌باشد. در رزین خالص پس از افت ناگهانی تنش، ترک‌های بوجود آمده تحت تأثیر تنش برشی رشد می‌کنند. ترک اصلی از گوشه‌های سطوح بالایی و پایینی شروع شده و به صورت 45° تا عمق ماده نفوذ می‌کند. شکل 4 شماتیک شروع و جهت حرکت این ترک‌ها را نشان می‌دهد. پدیده کرنش سختی سبب افزایش میزان تنش شده و به عبارتی ماده رزینی به سختی حرکت کرده و فشرده می‌شود. مواد حرکت به سمت عرضی را شروع کرده و در نمونه تغییر شکل بشکلهای<sup>3</sup> رخ می‌دهد (شکل 5).

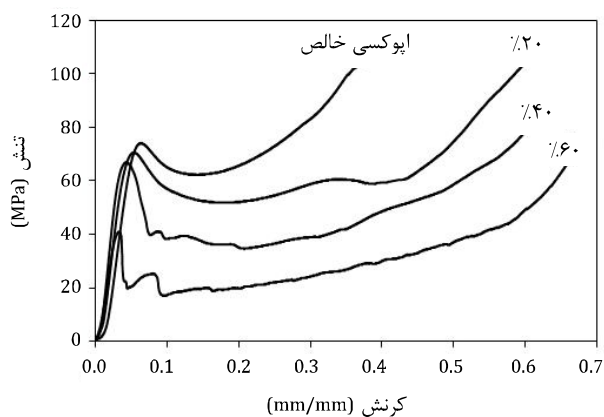


شکل 3 نمودار شماتیک تغییر شکل فوم تحت فشار [1]

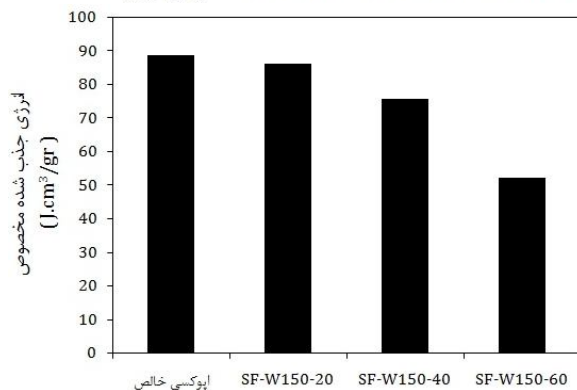
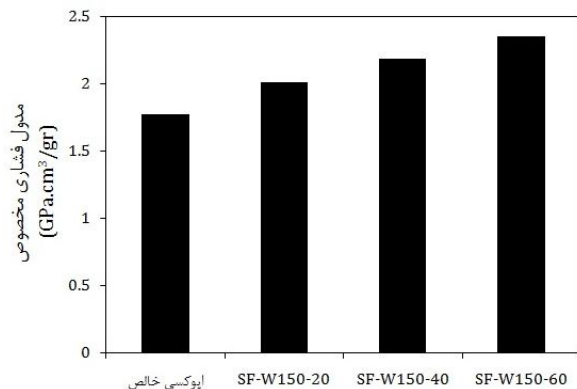
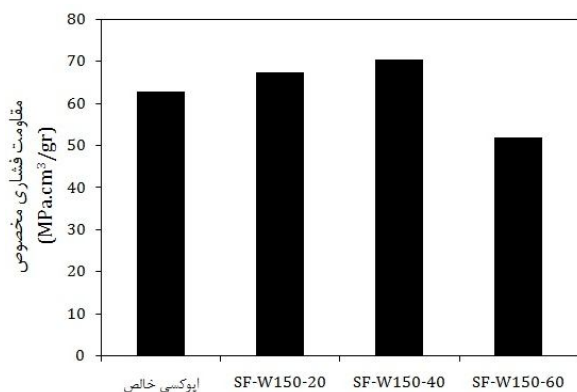


شکل 4 شکل شماتیک نمونه تحت آزمایش و شروع ترک اولیه

1- Plateau Stress  
2- Densification Region  
3- Barreling



شکل 8 نمودار تنش-کرنش فوم ترکیبی با میکروبالن W150 و 3 درصد مختلف به همراه رزین خالص



شکل 9 مقایسه بین مقاومت مخصوص، مدول مخصوص و انرژی مخصوص فوم با میکروبالن W150 و رزین خالص

### 3-3-2- تأثیر اندازه و استحکام میکروبالن

یکی از فاکتورهایی که می‌توان با تغییر دادن آن تأثیر مستقیمی روی خواص

نمودار تنش - کرنش در فاصله بین کرنش 10 تا 50 درصد به عنوان تنش پلاتو در نظر گرفته می‌شود.

لازم به ذکر است مقایسه بین فوم‌های مختلف و تأثیر عوامل درصد حجمی و اندازه میکروبالن با استفاده از نتایج آزمایش فشار در نرخ کرنش  $10^{-3}$  صورت گرفته است.

### 3-3-1- تأثیر درصد حجمی

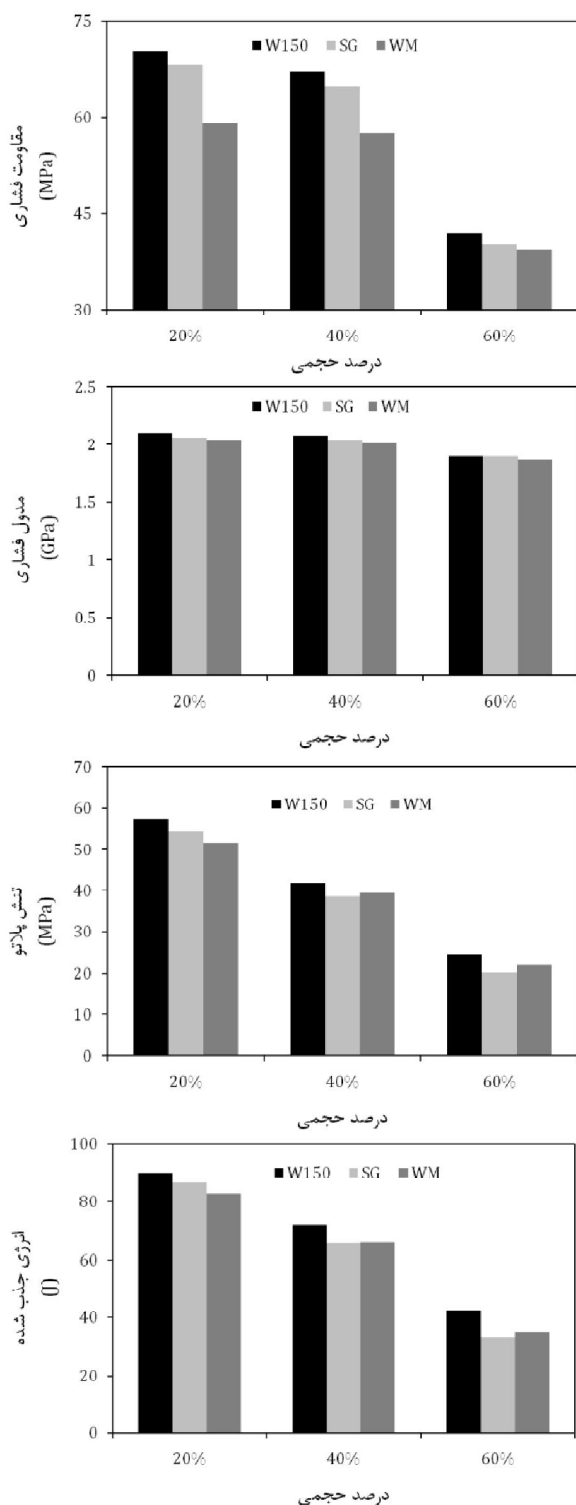
شکل 8 نمودار تنش کرنش فوم ترکیبی با میکروبالن W150 در 4 درصد حجمی مختلف را نشان می‌دهد. نمودارهای تنش - کرنش دو میکروبالن دیگر نیز به همین شکل هستند. نتایج به وضوح نشان می‌دهند که با افزایش درصد حجمی میکروبالن در ماتریس مقاومت فوم در هر ناحیه از نمودار کاهش می‌یابد. کاهش تنش حداکثری که در انتهای قسمت الاستیک خطی رخ می‌دهد، برای فوم با 20% حجمی میکروبالن، در حدود 5% و برای فوم با 40% حجمی میکروبالن 10% است. ولی با افزایش درصد حجمی میکروبالن به 60%، این میزان افت سریع‌تری دارد و کاهش 40% نسبت به رزین خالص را نشان می‌دهد. در حالت کلی کاهش تنش با افزایش درصد حجمی را می‌توان به کاهش ماده رزینی در نمونه‌های تحت آزمایش نسبت داد. زیرا که عمده بار روی ماده رزینی است تا میکروبالن‌ها [14].

مدول ناحیه الاستیک با افزایش درصد حجمی نیز اندکی کم می‌شود ولی قابل اغماض است. در عین حال کرنشی که تنش حداکثری در آن صورت می‌گیرد با افزایش درصد حجمی کاهش می‌یابد و ماده زودتر به حالت تسلیم می‌رسد.

نکته قابل توجه دیگر این است که با افزایش درصد حجمی میکروبالن، ناحیه پلاتو بزرگتر خواهد بود. یا به عبارتی مترآکم شدن ماده و افزایش تنش دیرتر اتفاق می‌افتد. این مورد یکی از چندین عللی است که از فوم ترکیبی می‌توان در سازه‌های محافظ استفاده کرد. اگرچه رزین خالص تحمل بار بیشتری دارد و تنش بیشتری را متحمل می‌شود؛ ولی اگر در سازه‌های چندلایه استفاده شود همین بار را به لایه‌های پشتی منتقل خواهد کرد. در حالی که فوم با تخریب خود، جایگیری کمتری داشته و نیروی کمتری به لایه‌های بعدی خود منتقل خواهد کرد.

به دلیل کاهش تنش در نمودار تنش - کرنش، در کل فرایند آزمایش فشار با افزایش درصد حجمی میکروبالن در فوم، انرژی جذب شده کاهش پیدا می‌کند. به دلیل سبک شدن فوم‌ها با افزایش میکروبالن آن، بایستی در مقایسه بین فوم‌ها از مقادیر مخصوص آنها که بر حسب وزن فوم هستند، استفاده شود. نمودارهای شکل 9 مقایسه‌ای بین مقادیر مقاومت مخصوص، مدول مخصوص و انرژی جذب شده مخصوص بین چند فوم W150 با درصد حجمی متفاوت را نشان می‌دهد. نتایج حاکی از آن است که با افزایش درصد حجمی میکروبالن تا 40%، مقاومت مخصوص افزایش می‌یابد ولی برای فوم با درصد حجمی 60%، به شدت افت می‌کند. دلیل اصلی این افت را می‌توان به داشتن حباب زیاد ناخواسته در ماتریس فوم 60% مرتبط دانست. ماتریس موجود در این فوم‌ها، که بار اصلی در ناحیه الاستیک خطی بر روی آن است، نسبت به کاهش وزن، کاهش بیشتری داشته و عیوب بیشتری نسبت به فوم‌های 20% و 40% دارد و ضعیف‌تر است.

شرایط برای مدول متفاوت است. با افزایش درصد حجمی مدول الاستیک مخصوص نیز افزایش می‌یابد. تفاوت بین انرژی مخصوص فوم‌ها در نمودار نشان دهنده آن است که کاهش انرژی جذب شده، بیشتر از کاهش وزن آن است.



شکل 10 تنش حداکثر، مدول الاستیک، تنش پلاتو و انرژی جذب شده فوم‌ها با سه نوع میکروبالن و سه درصد حجمی متفاوت

انرژی جذب شده توسط فوم‌ها در کل مسیر همانند دو عامل قبلی به متغیر اندازه و مقاومت شکست میکروبالن بستگی دارد. به این صورت که هر چه درصد حجمی کمتر باشد، عامل اندازه میکروبالن تأثیرگذارتر است. با افزایش درصد حجمی تأثیر عامل مقاومت شکست میکروبالن بیشتر می‌شود.

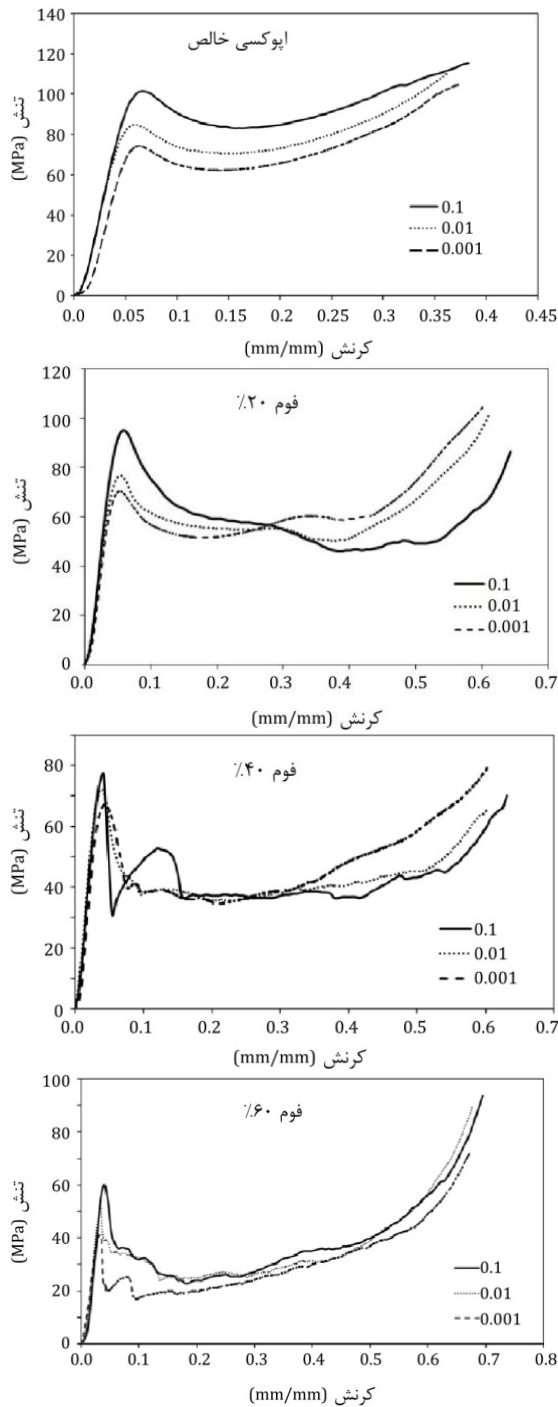
### 3-3-3- تأثیر نرخ کرنش

نمودارهای شکل 11 اثر نرخ کرنش را برای اپوکسی و فوم W150 در هر سه

نهایی فوم ترکیبی گذاشت، نوع میکروبالن آن می‌باشد. میکروبالن‌های سرامیکی به سبب استحکام بالا عموماً در فوم‌های ترکیبی با زمینه فلزی استفاده می‌شوند [10]. گرچه استفاده از آنها در فوم‌های ترکیبی با ماتریس پلیمری نیز رایج است [11]. سه میکروبالن سرامیکی استفاده شده در این تحقیق با داشتن چگالی مؤثر نزدیک به هم و درصد ضخامت یکسان، از نظر اندازه قطر و استحکام فشاری با هم متفاوت هستند. میکروبالن W150 به لحاظ استحکام با میکروبالن WM یکسان است ولی میکروبالن‌های WM از نظر اندازه دو برابر میکروبالن‌های W150 هستند. از طرفی میکروبالن‌های نوع SG از نظر اندازه بین دو نوع WM و W150 هستند ولی استحکام دیواره این میکروبالن‌ها کمتر از دو نوع مذکور است.

نمودارهای شکل 10 تفاوت بین تنش حداکثری ناحیه الاستیک خطی، مدول ناحیه الاستیک، تنش پلاتو و انرژی جذب شده را در سه نوع میکروبالن مورد آزمایش نشان می‌دهند. نتایج حاکی از آن است که در درصد‌های حجمی پایین، هرچه اندازه میکروبالن بزرگتر باشد، استحکام تسلیم فوم پایین‌تر است. همچنین هرچه درصد حجمی بالاتر رود، از تفاوت بین مقادیر کاسته می‌شود. نقطه تنش حداکثری در ناحیه الاستیک خطی، جایی است که ترک‌های ریز داخل ماتریس شروع به رشد ناگهانی می‌کنند. این رشد ترک از سه مسیر می‌تواند صورت گیرد. الف) داخل ماتریس ب) مرز بین ماتریس و میکروبالن ج) با شکست میکروبالن و عبور از آن. در واقعیت رشد ترک از هر سه مسیر صورت می‌گیرد. منتها بسته به اینکه کدام مسیر انرژی کمتری را جذب می‌کند، ترک از همان مسیر عبور می‌نماید. در حالت کلی میکروبالن‌ها اگرچه عیوب را به ساختار ماتریس وارد می‌کنند، ولی بسته به شرایط به مانند سدی در مقابل رشد ترک نیز هستند. حال هرچه قدر قطر میکروبالن کوچکتر باشد، تعداد میکروبالن‌ها بیشتر است. افزایش تعداد میکروبالن‌ها ممکن است هم عیوب و هم مزایا را گسترش دهد. بدین صورت که هم مرز (فضا برای رشد ترک) بین ماتریس و میکروبالن بیشتر می‌شود و هم تعداد سدها در مقابل رشد ترک افزایش می‌یابد. عامل تعیین کننده در این وضعیت، اتصال بین میکروبالن و ماتریس است. اگر اتصال بین میکروبالن و ماتریس قوی باشد، در شرایط بارگذاری فشاری که این اتصال را تقویت می‌نماید، استحکام تسلیم فوم با افزایش تعداد میکروبالن‌ها، بیشتر می‌شود. اگرچه میکروبالن‌ها کوچک‌تر باشند.

مدول الاستیک تقریباً در هر سه نوع فوم و در هر سه درصد حجمی یکسان است. این مسأله را می‌توان به درصد ضخامت یکسان هر سه نوع میکروبالن نسبت داد. جایی که تغییر شکل الاستیک سه نوع فوم که به یک اندازه ماتریس و به یک اندازه میکروبالن سرامیکی دارند، با هم برابر خواهد بود. تنش پلاتو برای درصد‌های حجمی پایین به نسبت اندازه میکروبالن‌ها است. هرچه اندازه میکروبالن کوچک‌تر باشد، تنش بالاتر است. در درصد‌های حجمی بالا، اندازه تنش‌ها به هم نزدیک شده و اختلاف بین آنها کم می‌شود. همان‌طور که در قسمت قبلی توضیح داده شد، در ناحیه پلاتو با شکست مداوم میکروبالن‌ها، مواد ماتریس در فضای خالی بوجود آمده جای می‌گیرند و تغییر شکل فوم با نیروی کمتری صورت خواهد گرفت. از این‌رو در این ناحیه مقاومت فوم علاوه بر تعداد میکروبالن‌ها به مقاومت شکست آنها نیز بستگی دارد. همانند نتایج حاصل از مقایسه مقادیر تنش تسلیم، با افزایش درصد حجمی، اثر اندازه کم شده و مقاومت شکست میکروبالن عامل اصلی خواهد بود. مطابق آنچه گفته شد، نتایج نشان می‌دهند اگرچه در فوم‌های 20% تنش پلاتو برای فوم SG بیشتر از WM است، اما در فوم‌های 60% تنش پلاتو فوم WM به خاطر داشتن استحکام بالاتر، بیشتر از تنش پلاتو فوم SG است.



شکل 11 نمودار تنش-کرنش اپوکسی خالص و فوم با میکروبالن W150 در سه درصد حجمی متفاوت و در سه نرخ کرنش



شکل 12 تغییر شکل‌های متفاوت یک نوع فوم در سه نرخ کرنش

5- مراجع

[1] G. Lorna J., A. Michael F., *Cellular Solids – structure and properties*, second ed. UK: Cambridge University Press, 1999.

درصد حجمی نشان می‌دهند. روند نمودار تنش - کرنش برای تمامی فوم‌های W150، WM و SG به یک شکل است. با افزایش نرخ کرنش، تنش حداکثری افزایش پیدا کرده و مدول به صورت خیلی جزئی افزایش پیدا می‌کند. نتایج نشان می‌دهند که هرچه درصد حجمی فوم بالاتر رود، تغییرات بین بارگذاری - های با نرخ کرنش متفاوت، کمتر خواهد شد. به این معنی که در فوم ترکیبی موجود، رزین اپوکسی به نرخ بارگذاری حساس است که با کم شدن میزان این ماده در فوم، حساسیت به نرخ کرنش نیز کاهش می‌یابد. در نمودارهای فوم 60% هر سه نمودار با نرخ کرنش متفاوت تقریباً مشابه هم هستند.

همان‌طور که از نمودارها دریافت می‌شود، کرنش 0/2 محل تلاقی نمودارها است. تا قبل از این کرنش، مقادیر تنش برای نرخ کرنش 10-1 بیشتر از مقادیر متناظر نمودارهای دو نرخ کرنش دیگر است. از حوالی این نقطه به بعد، مقادیر تنش برای نرخ کرنش 3-10 از دو نرخ کرنش دیگر بیشتر می‌شود. در حالت کلی رشد ترک در بسیاری از مواد یک پدیده وابسته به زمان<sup>1</sup> است. به این معنی که رشد ترک در این مواد نیازمند زمان کافی است. در نرخ کرنش بالا، سرعت تغییر شکل مواد تحت بارگذاری و حرکت نابجایی‌ها به اندازه‌ای است که ترک فرصت رشد در جهتی که حداقل انرژی را جذب کند نخواهد داشت. بنابراین طبیعی است که با افزایش سرعت بارگذاری، ماده تحت فشار در ابتدا مقاومت بیشتری از خود نشان دهد. اما این نکته باقی است که هرچه سرعت بارگذاری بیشتر شود، نیروی اینرسی مواد تحت تغییر شکل بیشتر شده، تغییر شکل در راستای عرضی بیشتر و با سرعت بالاتری انجام می‌شود. شکل 12 تفاوت بین تغییر شکل سه فوم یکسان ولی بارگذاری شده با سه سرعت متفاوت را نشان می‌دهد. در نمونه بارگذاری شده با سرعت بیشتر، اجزای کناری فوم کاملاً از دو مخروط بالا و پایین جدا شده‌اند. در صورتی که در بارگذاری با سرعت پایین، هنوز اجزای کناری متصل به بقیه اجزا بوده و در تحمل بار شرکت می‌کنند.

4- نتیجه گیری

با استفاده از مقادیر مقاومت تسلیم، مدول الاستیسیته، تنش پلاتو، انرژی جذب شده و همچنین مقاومت تسلیم مخصوص، مدول مخصوص و انرژی جذب شده مخصوص چندین فوم با سه نوع میکروبالن و در سه درصد حجمی متفاوت، مورد آزمون فشار قرار گرفتند تا تأثیر اندازه میکروبالن، درصد حجمی و نرخ بارگذاری در خواص مکانیکی آنها مشخص شود. نتایج بدست آمده به شرح زیر می‌باشند:

الف) با افزایش درصد حجمی میکروبالن میزان حباب هوای ناخواسته درون ماتریس رزینی افزایش می‌یابد.

ب) با افزایش درصد حجمی میکروبالن مقاومت تسلیم، تنش پلاتو و انرژی جذب شده کاهش می‌یابند. مدول الاستیسیته تغییر چندانی نمی‌کند. در عین حال با دخیل کردن وزن نمونه‌ها، مقاومت مخصوص و مدول الاستیسیته با افزایش درصد حجمی، بیشتر می‌شوند.

ج) برای فوم‌های با درصد حجمی 20% و 40% با افزایش اندازه قطر میکروبالن، مقاومت مخصوص، تنش پلاتو و انرژی جذب شده کاهش می‌یابند. با افزایش درصد حجمی فوم به 60% اثر اندازه میکروبالن کاهش یافته و اثر استحکام میکروبالن تأثیر بیشتری خواهد یافت. این اثر در تنش پلاتو محسوس تر است.

د) با افزایش نرخ کرنش مقاومت فوم به شکل محسوس و مدول الاستیسیته نیز خیلی جزئی افزایش می‌یابند. با افزایش درصد حجمی و کاهش میزان ماده رزینی در فوم از حساسیت به نرخ کرنش نیز در تمامی فوم‌ها کاسته می‌شود.

1- Time Dependant

- [9] H. Mae, M. Omiya, K. Kishimoto, Effects of strain rate and density on tensile behavior of polypropylene syntactic foam with polymer microballoons, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 477, No. 1-2, 2008, pp. 168-178.
- [10] J.K. Cochran, Ceramic hollow spheres and their applications, *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, Vol. 3, No. 5, 1998, pp. 474-479.
- [11] P. Braun, T. Kinsella, J. Tarczynski, Energy absorbing properties of hollow sphere composites, *ESD Technology*, Vol. 53, 1992, pp. 7-11.
- [12] M. Yu, P. Zhu, Y. Ma, 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 & Design*, Vol. 47, 2013, pp. 80-89.
- [13] H. Ahmadi, G.H. Liaghat, M.M. Shokrieh, Experimental investigation of fabrication parameters effects on the mechanical properties of epoxy/ceramic microballoon syntactic foams, *Modares Mechanical Engineering*, In Press. (In Persian)
- [14] B.H. Rutz, J.C. Berg, A review of the feasibility of lightening structural polymeric composites with voids without compromising mechanical properties, *Advances in Colloid and Interface Science*, Vol. 160, No. 1-2, 2010, pp. 56-75.
- [2] A. Kaneyoshi, Iwasaki Kadzuo. In: Landrock Arthur H, editor. *Handbook of plastic foams-types, properties, manufacture and applications*, New Jersey: Noyes Publications, 1995.
- [3] N. Gupta, E. Woldesenbet, Hygrothermal studies on syntactic foams and compressive strength determination, *Composite Structures*, Vol. 61, No. 4, 2003, pp. 311-320.
- [4] N. Gupta, Characterization of Mechanical and Electrical Properties of Epoxy-Glass Microballoon Syntactic Composites, *Ferroelectrics*, Vol. 345, No. 1, 2006, pp. 1-12.
- [5] J. Bibin, N.C.P. Reghunadhan, D. Kameshwari, N.K. Ninan, Effect of low-density filler on mechanical properties of syntactic foams of cyanate ester, *Journal of Materials Science*, Vol. 42, No. 14, 2007, pp. 5398-5405.
- [6] P. Bunn, M. J. Tobby, Manufacture and compression properties of syntactic foams, *Composites*, Vol. 24, No. 7, 1993, pp. 565-571.
- [7] N. Gupta, E. Woldesenbet, P. Mensah, Compression properties of syntactic foams: effect of cenosphere radius ratio and specimen aspect ratio, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 35, No. 1, 2004, pp. 103-111.
- [8] E. Woldesenbet, S. Peter, Radius ratio effect on high-strain rate properties of syntactic foam composites, *Journal of Materials Science*, Vol. 44, No. 6, 2009, pp. 1551-1559.