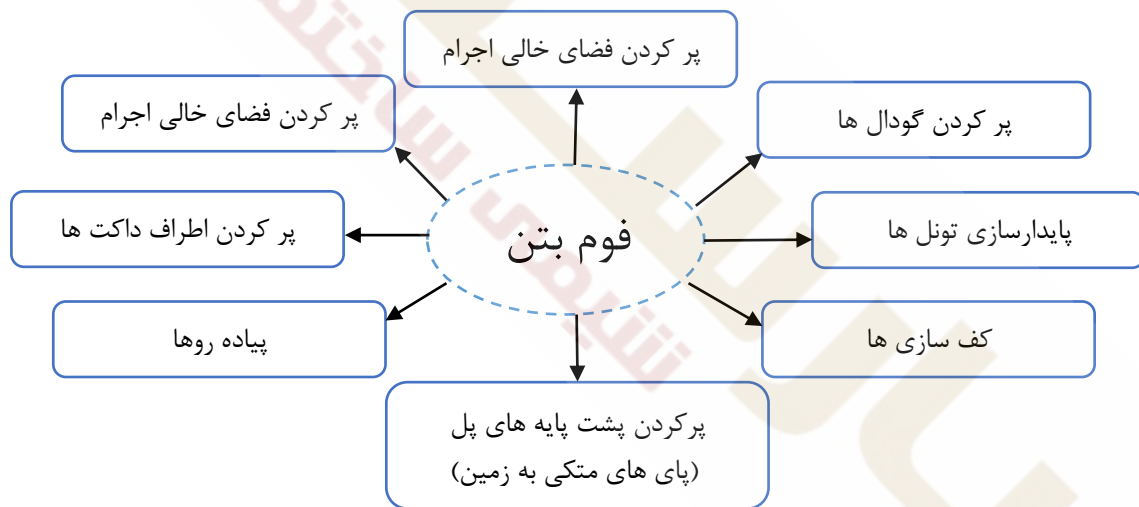


## بررسی ویژگی‌های مربوط به جمع‌شدگی، مقاومت و دوام فوم بتن

از نگاه عموم یک سردرگمی خاصی در تشخیص فوم بتن با سایر مخلوط‌های مشابه مثل بتن هوادار و بتن هوادهی شده وجود دارد. فوم بتن یک مخلوط سیمانی به شکل ملات پلاستیک، با حداقل میزان حباب هوای ۲۰ درصد حجمی است. با این حال یک تعریف ویژه که فوم بتن را از بتن هوادار و بتن هوادهی شده متمایز می‌سازد اینگونه است: سیستمی مملو از حفرات خالی منظم و نزدیک بهم که بطور قابل توجهی دانسیته و وزن المان را کاهش داده و در عین حال از آن عایقی کارآمد ساخته و مقاومت در برابر آتش را افزایش می‌دهد.

نخستین شکل فوم بتن بر پایه سیمان پرتلند در سال ۱۹۲۳ توسط اکسل اریکسون (Axel Eriksson) به ثبت رسید و سپس فعالیت‌های تولید تجاری در مقیاس کوچک شروع شد. والورا (Valora) در سال ۱۹۵۰ اولین مطالعات و بررسی‌های جامع بر روی فوم بتن را انجام داد. سپس کینیبرگ (Kinniburgh) و رودنای (Rudnai) در قالب گزارشی سیستماتیک، به ارائه ترکیبات، خواص و کاربردهای فوم بتن پرداختند. فوم بتن در آغاز به عنوان یک مصالح عایق، پایدارساز و پرکننده شناخته شد. توسعه پرونق این ماده‌ی جدید در صنعت ساخت و ساز در اواخر دهه ۱۹۷۰ افزایش یافت.



در طی ۳۰ سال اخیر، فوم بتن بطور وسیع برای تعمیر گودال‌ها، دیوار نگهدارنده، کف‌سازی سازه‌ها، عایق‌کاری، بعنوان پرکننده‌ای حجیم و... مورد استفاده قرار گرفته است. اخیراً نیز از فوم بتن به عنوان عضو غیرسازه‌ای یا شبه سازه‌ای برای امور تزریق تونل‌ها و تعمیر آسیب‌ها استفاده می‌شود.

بی‌تردید فوم بتن به عنوان نوعی بتن مورد کاربرد در امور اجرایی و ساخت و ساز، دارای ضعف‌هایی به لحاظ عملکرد مکانیکی و دوام می‌باشد. بحث پیرامون خواص و ویژگی‌های فوم بتن در این مقاله عمدتاً بر اساس کاربردهایی است که در آن پتانسیل ایجاد مسائل و مشکلاتی مانند نشت آب‌های زیرزمینی، مقاومت سازه‌ای ناکافی، ترک و شکست‌های سازه‌ای، مسائل مربوط به پایداری و خوردگی، وجود دارد. در ادامه ویژگی‌هایی مانند جمع‌شدگی ناشی از خشک شدن، مقاومت فشاری و دوام مورد بررسی قرار گرفته است.

## جمع‌شدگی ناشی از خشک شدن در فوم بتن

عدم وجود سنگدانه‌های درشت در فوم بتن، این مخلوط را ۴ تا ۱۰ برابر بیش‌تر از بتن معمولی مستعد جمع‌شدگی می‌کند. عوامل دیگری نیز وجود دارند که مستقیماً بر جمع‌شدگی فوم بتن تأثیر می‌گذارند. از جمله این عوامل دانسیته‌ی مخلوط فوم بتن، نوع عامل کفزا، وجود یا عدم وجود فیلر و سایر افزودنی‌ها و میزان رطوبت محیط است. جدول زیر مقادیر مختلف جمع‌شدگی مشاهده شده در مصالح پایه سیمانی را نشان می‌دهد.

The drying shrinkage values observed in typical cement-based materials				
Material	Cement paste	Cement mortar	Cement concrete	Foamed Concrete
Drying shrinkage (%)	0.15–0.3	0.08–0.2	0.06–0.09	0.15–0.35

عموماً جمع‌شدگی ناشی از خشک شدن با کاهش مقدار دانسیته فوم بتن کاهش خواهد یافت. در بررسی اثر عامل کفزا این‌گونه می‌توان گفت که اختلاف در میزان جمع‌شدگی فوم بتن‌های مختلف ناشی از ساختار ضعیف فوم بتن است. بدین ترتیب که هر چقدر اتصال ساختاری ضعیف‌تر باشد، میزان جمع‌شدگی افزایش خواهد یافت. نتایج بررسی‌های جونز نشان داد که استفاده از ماسه ریز بجای خاکستر بادی میزان جمع‌شدگی فوم بتن را کاهش می‌دهد. این امر بدان سبب اتفاق می‌افتد که ماسه ریز یک ظرفیت فوق‌العاده‌ای برای مقاومت در برابر تغییرشکل‌های ناشی از جمع‌شدگی ایجاد می‌کند. بسیاری از یافته‌ها نشان می‌دهد که سنگدانه‌های ریز مانند سرامیک سبک، پرلیت منبسط شده، میکروسفر شیشه‌ای و عامل منبسط‌کننده منیزیم به همراه کاهش حجم فوم می‌توانند انقباض ناشی از خشک شدن را کاهش دهند.

گزارشات نشان می‌دهد که تکنیک اتوکلاو حدود ۱۲ تا ۵۰ درصد جمع‌شدگی ناشی از خشک شدن را کاهش داده و منجر به بهبود مقاومت فوم بتن می‌شود. بنابراین اتوکلاو کردن گزینه ایده‌آلی جهت نگهداری قطعات ساخته شده با فوم بتن با سطح جمع‌شدگی و مقاومت قابل قبول می‌باشد. کنترل مقدار آب، انتخاب سیمان و عامل فومزای مناسب، همچنین اصلاح مخلوط با افزودن سنگدانه‌های ریز جزو مواردی هستند که جمع‌شدگی را تحت تأثیر قرار می‌دهند. استفاده از الیاف نیز بطور قابل توجهی ظرفیت مقاومت در برابر جمع‌شدگی را افزایش می‌دهد. الیاف در واقع با بهبود مقاومت کششی مخلوط و جلوگیری از توسعه ترک و تغییرشکل مقطع منجر به کاهش جمع‌شدگی می‌شود. جدول زیر برخی یافته‌ها در مورد نتایج مختلف جمع‌شدگی فوم بتن را نشان می‌دهد.

Review of filler, foaming agent, and additive used in FC, and the resulting density ranges and drying shrinkage					
Filler	Foaming agent	ratio	Additive	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Drying shrinkage (%)
Blast-furnace slag + limestone fine	Fatty alcohol-based liquid	0.29	Magnesium expansive agent + calcium sulfoaluminate	1611–1638	0.05–0.32 (28 d)
Polymer fiber	Foamin	0.3	Viscosity enhancing agent	380–830	0.1–0.49
N/A	Animal based + synthetic + plant based surfactants	0.5	N/A	600	0.25–0.3 (90 d)
Crushed sand + FA	Hydrogen peroxide	0.3	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> + NaOH	1889–2106	0.09–0.1 (180 d)
FA + natural sand	Protein foaming agent	0.71-2.22	N/A	1000–1400	0.09–0.2 (365 d)
N/A	Synthetic polymeric latex	0.45-0.6	N/A	260–800	0.18–0.31
N/A	Synthetic based	0.52-0.75	N/A	300–800	0.26–0.35 (90 d)
Sand	Hydrolyzed protein	0.5	N/A	900–1100	0.7–0.72 (28 d)
Quartz sand	PB-2000	N/A	Microreinforcing additive	N/A	0.15–0.3
FA	Organic based	0.3-0.5	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> + Trietanolamine	400–800	0.09–0.18 (28 d)

N/A, not available; FA, fly ash

برخی عوامل نامطلوب مانند عمل‌آوری سریع و ضعیف، میزان آب ناکافی یا شرایط سخت و بد تولید فوم بتن ممکن است باعث تبخیر آب و نتیجتاً منجر به جمع‌شدگی و ترک شود. برخی اقدامات فنی جهت بهبود این شرایط به شرح زیر است:

- استفاده از مقدار سیمان مناسب
- نسبت آب به سیمان پایین
- استفاده از افزودنی‌های ضد آب
- استفاده از توری جهت جلوگیری از ایجاد ترک

### عوامل موثر بر مقاومت فشاری فوم بتن

اگرچه مطالعات عمیقی در زمینه فوم بتن انجام شده است اما وجود برخی کاستی‌ها مانند مقاومت فشاری هنوز استفاده وسیع از این مصالح را محدود کرده است. مقاومت فوم بتن با توجه به نوع و ترکیب مصالح سیمانی، عیار سیمان، نسبت‌های اختلاط، نسبت آب به سیمان، حجم فوم، عامل فوم‌زا، روش‌های عمل‌آوری، سایر افزودنی‌ها و... تعیین می‌گردد. جدول زیر برخی مطالعات در مورد فاکتورهای تاثیرگذار بر مقاومت فشاری فوم بتن را نشان می‌دهد.

**Overview on research on factors affecting compressive strength of FC.**

<b>Composites</b>	<b>Factors investigated</b>	<b>28 d CS</b>	<b>Main findings and conclusions</b>
OPC	(i)Curing condition (ii)Fiber content (iii)Dry density	1.56-13.38	(1) Compressive strength increases with dry density increase in nearly linear, while bending strength increases more obviously. (2) The flexural strength was significantly increased when fiber content increased to a certain extent, but the compressive strength was not significantly affected.
Cement, sand	(i)Coconut fiber content	9.6-14.6	(1) The volume increase of coconut fiber particle aggregate in FC can significantly enhance compressive strength with a maximum value of 15%.
OPC	(i) Water-cement ratio	3-5.1	(1) The FC compressive strength varies in an inverted V-shape with the increase of water cement ratio.
OPC	(i) Bentonite slurry content	3-4.7	(1) The compressive strength decreases with mixing content increase of bentonite slurry.
OPC, GBFS, FA	(i) Foam stabilizer	1.7-2.3	(1) XG stabilizer performs positively on thermal conductivity and compressive strength of FC. (2) The compressive strength with mechanical and chemical foaming increased by 34% and 20%, respectively.
OPC	(i) Foaming agents (ii) Dry densities (iii) Cement type	0.20-11.74	(1) The compressive strength increases more obviously when protein based foaming agent is used in mix design as its positive effect on pores. (2) The maximum strength value was recorded in cellophane curing while the minimum one was found in air curing.
OPC	(i) Aggregate substitution	Mar-48	(1) Slag partially substituted for fly ash improves FC strength at room temperature, but leads to a drying shrinkage and strength loss at high temperature.
Cement, natural sand	(i) Additive types	Jun-47	(1) The reinforcement of pore structure and microstructure improvement of cement paste are helpful to improve FC strength. (2) The combination of additives reduces size and connectivity of pores and prevents them from merging as well as produces narrower pores distribution, and achieves higher strength.
OPC	(i) Different sand grading	5.6-7.0	(1) The samples prepared with 0.60 mm sand have the highest compressive strength compared to those prepared with coarse sand grade. (2) The whole water curing provides a better development environment for strength increase compared to the air curing.
OPC	(i) Different pumice types	0.5-3.5	(1) The pumice-based FC has the highest compressive strength. (2) The density-based empirical model for compressive strength prediction was proposed.
OPC, fine sand,	(i) Different filler types	23-Apr	(1) Adding superfine GGBS as a partial substitute for cement can increase strength slightly without significantly changing mix and workability. (2) The strength with small pore diameter and uniform pore size is higher than other samples.
OPC	(i) Recycled waste as filler	1.53-10.26	(1) Recycled glass-filled FC has higher compressive strength compared to that filled with plastic. (2) The addition of superplasticizer reduces the amount of macropore and greatly improves the strength.
OPC, sand	(i) Recycled waste as filler	5.2-6.8	(1) Compared with FC produced with 100% addition of river sand, using refined mineral powder as filler can improve compressive strength and strength performance index.

OPC, ordinary Portland cement; FA, fly ash; CS, compressive strength (unit: MPa); GBFS, granulated blast furnace slag

می‌دانیم که مقدار چگالی، مقاومت را کنترل می‌کند. ازین رو باید به دنبال تعادلی بین دانسیته و مقاومت باشیم تا با حداقل‌ترین دانسیته ممکن به بیشترین مقاومت برسیم. در پاره‌ای از مواقع این امر با بهینه‌سازی مقدار مصالح سیمانی، انتخاب عامل فوم‌زای با کیفیت و سنگدانه فوق سبک قابل حصول است. نامبیار طی آزمایشاتی نشان داد که در مقدار دانسیته برابر فوم بتن، با کاهش سایز ذرات ماسه، مقاومت فوم بتن سخت شده افزایش می‌یابد. همچنین مقدار حجم فوم وارده تاثیر قابل توجهی بر جریان فوم بتن تر داشته و کاهش سایز ذرات فیلر نیز مقاومت را بهبود می‌دهد. پارک و همکارانش نیز الیاف کربن را به مخلوط فوم بتن اضافه کردند و نتایج اندازه‌گیری‌ها حاکی از بهبود معنادار مقاومت و سختی بود. نسبت آب به سیمان پایین منجر به روانی پایین مخلوط شده و بنابراین به دلایل تراکم نامناسب مقاومت را کاهش می‌دهد. افزایش نسبت آب به سیمان تا جایی که از روانی مناسب مخلوط اطمینان حاصل شود منجر به رشد مقاومت خواهد شد. یک فاکتور قالب تاثیرگذار در مقاومت، کیفیت سیمان مورد استفاده می‌باشد بطوریکه استفاده از سیمان پر مقاومت بهترین راه افزایش سطح مقاومت است. با این حال مقدار افزایش در هزینه سیمان نیز باید همواره در نظر گرفته شود.

بررسی‌ها نشان می‌دهد که مقاومت فوم بتن با افزایش تعداد حفرات داخل آن کاهش می‌یابد. تاثیر عامل فوم‌زا بر مقاومت عمدتاً بر اساس اندازه‌ی حباب‌های هوای محبوس، توزیع یکنواخت حباب‌ها، پایداری فوم و ظرفیت فوم‌زایی آن تعیین می‌گردد. در حالت ایده آل، انتخاب یک عامل فوم‌ساز مناسب باید براساس قابلیت فوم‌زایی قوی، ظرفیت پایین حمل آب و تأثیرات نامطلوب اندک بر روی فوم بتن انجام شود.

## شاخص‌های دوام در فوم بتن

المان‌های در تماس با محیط و زمین معمولاً با شرایط مضر و نامطلوب مختلفی از جمله تغییرات دما، سیکل‌های ذوب و یخ و خوردگی ناشی از عوامل اسیدی مواجه هستند. این عوامل در نهایت منجر به دوام پایین اعضا و سازه‌های ساخته شده با فوم بتن شده و باعث خرابی‌ها و آسیب‌های جدی خواهد شد. از همین رو بررسی فاکتورهای تاثیرگذار بر دوام فوم بتن از اهمیت ویژه‌ی برخوردار است.

**نفوذپذیری:** جذب آب فوم بتن به دلیل وجود بیش از ۲۰ درصد حباب هوا در داخل آن، بیش از دو برابر بتن معمولی است. همین جذب آب بالای فوم بتن به تشکیل و اتصال منافذ موپینه کمک می‌کند. اضافه کردن سنگدانه به فوم بتن تخلخل و نتیجتاً نفوذپذیری آن را کاهش می‌دهد. افزایش نسبت خاکستر بادی به سیمان بخصوص در دانسیته‌های پایین نفوذپذیری بخار آب را افزایش می‌دهد.

روش‌های مختلفی جهت ارزیابی تاثیر ساختار منافذ، تخلخل، و سایز بحرانی منافذ بر نفوذپذیری و جذب آب فوم بتن توسط محققان بکار گرفته شده است. نتایج نشان می‌دهد که قطر بحرانی منافذ ( $>200\text{ nm}$ ) با افزایش دانسیته کاهش می‌یابد که این کاهش با میزان نفوذپذیری رابطه مستقیم دارد. بنابراین، توانایی

تولید فوم بتنی با حباب‌های هوای پایدار، کوچک و یکنواخت از حیث کاهش نفوذپذیری خمیر سیمانی بسیار حائز اهمیت است. این کاهش در نفوذپذیری به دلیل اثراتی است که پخش یکپارچه و ایزوله حباب‌ها ایجاد می‌کند.

میزان جذب آب فوم بتن عمدتاً به نوع فیلر انتخابی، ساختار منافذ، و مکانیزم رسوخ آب وابسته است. گزارش‌ها نشان می‌دهد که وجود فیلر سنگدانه‌های معدنی بر ساختار منافذ و نفوذپذیری خمیر سیمان تأثیر می‌گذارد. جونز و مک کارتی مقایسه‌ای بین جذب آب فوم بتن دارای خاکستر بادی و ماسه انجام دادند. نتایج حاکی از میزان جذب آب بالای فوم بتن دارای خاکستر بادی بود. تحقیقات انجام شده توسط آوانگ و احمد نشان داد که جذب آب با اضافه شدن الیاف فولاد و پلی پروپیلن در مخلوط پایه به طور چشمگیری افزایش می‌یابد. هر نوع الیاف دارای مورفولوژی سطحی متفاوتی است که نقش مهمی در میزان جذب آب فوم بتن ایفا می‌کند. مطالعه‌ی دیگر نشان داد که استفاده از افزودنی‌های پوزولانی و تکنیک اختلاط قوی‌تر می‌تواند فوم بتنی مقاوم در برابر آب و با دوام ایجاد کند.

**مقاومت در برابر یخ‌زدگی:** سیکل‌های ذوب و یخبندان یکی از عوامل مهم در تخریب و آسیب‌المان‌های بتنی است. تحقیقات نشان داده که افزودن پودر سنگ آهک به فوم بتن مقاومت در یخ‌زدگی را کاهش می‌دهد. آزمایشات انجام شده برای نسبت‌های مختلف اختلاط فوم بتن این نتیجه را در بردارد که مقاومت، عمق نفوذ ابتدایی و میزان جذب آب تأثیر قابل توجهی بر مقاومت در برابر یخ‌زدگی دارند و در مقابل دانسیته و نفوذپذیری کمترین اثر را دارند.

**کربناسیون:** پدیده کربناسیون ریسک ترک‌خوردگی و کاهش دوام فوم بتن را افزایش می‌دهد. جونز و مک کارتی در مطالعاتشان نشان دادند که با کاهش میزان دانسیته، فوم بتن بیشتر مستعد کربناسیون خواهد شد. با جایگزینی خاکستر بادی بجای استفاده از ماسه ریزدانه بطور قابل توجهی ظرفیت مقاومت در برابر کربناسیون افزایش می‌یابد. علاوه بر این، مقدار حجمی فوم در طرح با کاهش چگالی فوم افزایش می‌یابد و همین امر نیز پدیده‌ی کربناسیون را در فوم بتن کاهش می‌دهد.

**خوردگی:** مقاومت فوم بتن در محیط‌های فرسایشی مستقیماً به ساختار سلولی آن وابسته است. اگرچه، این ساختار سلولی شکل، لزوماً ظرفیت مقاومت در برابر نفوذ را کاهش نمی‌دهد، اما سیستم حفرات موجود، نوعی اثر محافظتی در برابر نفوذ سریع ایجاد می‌کنند. وجود سولفات در محیط به عنوان یک عامل خورنده، عمر مفید فوم بتن را تحت تأثیر قرار می‌دهد. فرسایش ناشی از سولفات به عنوان یک فرآیند پیچیده می‌تواند تحت تأثیر عوامل مختلفی نظیر نوع سیمان انتخابی، نسبت آب به مواد سیمانی، مدت زمان قرارگیری فوم بتن در معرض محیط سولفاتی، وجود مواد افزودنی معدنی، میزان نفوذپذیری و غیره باشد. رنجانی و رامامورتی بمدت ۱۲ ماه بصورت مداوم عملکرد نمونه‌های فوم بتن با چگالی‌های متغیر از ۱۰۰۰ تا ۱۵۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب را با فرو بردن نمونه‌ها به ترتیب در داخل محلول‌های سولفات سدیم و سولفات منیزیم مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که میزان انبساط نمونه‌های فوم بتن در محیط سولفات سدیم ۲۸٪ بیشتر از محیط سولفات منیزیم است که منجر به از دست دادن ۱٪ جرمی نمونه‌ها در محیط

سولفات منیزیم شد. علاوه بر این، مقاومت در برابر خوردگی نمونه‌های مورد مطالعه با کاهش مقدار چگالی فوم بتن افزایش یافت.

پایرسلط  
تتیمی ساختمان