



مطالعه پارامترهای موثر بر بتن فومی

کیاچهر بهفرنیا^۱، رضا عباسی^۲

۱- دکترای مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

۲- کارشناس ارشد سازه، اصفهان

kia@cc.iut.ac.ir

خلاصه

با پیشرفت قابل ملاحظه دانش علم مواد در زمینه های مختلف، محققین در زمینه تکنولوژی های نوین بتنی توانسته اند انواع گوناگونی از بتن را متناسب با کاربرد مورد نظر ابداع نموده و توسعه دهند بتن فومی که با استفاده از اختلاط ماسه، سیمان، آب و فوم ساخته می شود یکی از این نوع بتن ها می باشد که در چند سال اخیر فناوری ساخت و تولید آن رو به توسعه است و به دلیل وزن کم و خصوصیات حرارتی ممتازش مورد توجه و استقبال کاربران قرار گرفته است. در این مقاله ضمن معرفی بتن فومی و انواع آن نتایج مطالعات آزمایشگاهی صورت گرفته روی این بتن و مشکلات آن ارائه شده است همچنین تاثیر پارامترهای مختلفی همچون عیارسیمان، نسبت آب به سیمان و کاربرد مواد زائد و پوزولانی و مواد مضاف در طرح اختلاط مورد مطالعه قرار گرفته است.

کلمات کلیدی: تقویت، ورقهای CFRP، تیر مرکب

مقدمه

امروزه استفاده از بتن های سبک بدلیل مزایایی چون کاهش بار مرده سازه ها، خصوصیات حرارتی و صوتی و مقاومت فشاری قابل قبول از سوی دست اندرکاران صنعت ساختمان، رو به رشد است. یکی از انواع این بتن ها بتن سبک با ساختار سلولی از نوع بتن فومی یا بتن کفی است. این بتن در اواخر جنگ جهانی دوم توسط سوئدی ها ابداع شده است [۱]. البته بتن با ساختار سلولی قدمتی بسیار کهن و حتی در حدود ۵۰۰۰ سال دارد و شواهدی از آن در ایران و مصر یافت شده است، در آن زمان تخلخل و ایجاد حفره توسط افزودن خون حیوانات به مخلوط انجام می گرفته است [۱-۶]. به هر جهت بتن فومی علاوه بر مزایای مذکور دارای مزایای منحصر به خود است که استفاده از آنرا روز به روز با استقبال بیشتری رو به رو نموده است. اهم این مزایا عبارتند از عدم نیاز بتن فومی به کارگاه و تجهیزات پیچیده و امکان تولید ساده آن با یک دستگاه فوم ساز و میکسر در سایت، نیاز به سرمایه گذاری اولیه کم و عدم نیاز به استفاده از مواد، سنگدانه و افزودنی های خاص در طرح اختلاط آن. در واقع مصالح مورد نیاز بتن فومی تقریباً همان مصالح ریز دانه مصالح یک بتن معمولی است.

بررسیهای آزمایشگاهی

به منظور بررسی تاثیر پارامترهای مختلف بر خصوصیات بتن فومی یک سری مطالعات آزمایشگاهی در این تحقیق انجام پذیرفت. مواد اصلی ساخت بتن فومی عبارتند از، سیمان، آب، کف و ریزدانه (ماسه بادی، پودر سنگ و ...) که با مقادیر متغیر جهت بدست آوردن وزن حجمی و سایر خصوصیات مورد نظر لازم است در طرح اختلاط استفاده شوند. فوم ماده ای است با پایه پروتئینی یا شیمیایی که دارای خاصیت کف کنندگی پایدار است. منظور از پایداری این است که طی فرایند جابجایی و مخلوط کردن و همچنین تا زمان گیرش اولیه سیمان، کف خاصیت خود را حفظ کرده و در نهایت باعث ایجاد فضای متخلخل در بتن گردد.

^۲ استادیار دانشگاه صنعتی اصفهان



فوم های شیمیایی از پایداری کمتری برخوردار بوده و معمولاً جهت ساخت بتن های با وزن حجمی بالاتر و بتن های سازه ای کاربرد دارد. همچنین دوام این فوم کمتر از نوع پروتئینی است، فوم پروتئینی دارای دوام و پایداری و کیفیت کف مناسب تری است اما دارای عمر مصرف کوتاهی بوده و نگهداری دراز مدت مواد اولیه آن امکان پذیر نمی باشد.

جهت تولید کفی پایدار و با غلظت مناسب، ماده پایه به همراه آب رقیق شده و در دستگاه کف ساز ریخته می شود. این دستگاه از دو قسمت اصلی تشکیل شده قسمت، بخش مخزن که خود شامل میکسرهای مخصوص است و آب و ماده پایه را در خود جای می دهد و بخش پمپ و کمپرسور جهت ایجاد هوا که نیاز به تامین فشار حداقلی می باشد، شکل (۱). محصول نهایی خارج شده از این دستگاه همان فوم مورد نیاز است که باید به مخلوط بتن اضافه شود، روشهای مختلفی جهت اختلاط فوم با بتن وجود دارد که مناسب ترین آن بدین گونه است که ابتدا بتن پایه شامل سیمان، آب و ماسه ساخته می شود و سپس فوم به آن اضافه می گردد. خوشبختانه هر دو نوع فوم شیمیایی و پروتئینی در داخل کشور قابل تهیه می باشد. در جدول (۱) خلاصه ای از خصوصیات سه نوع فوم تولید داخلی ارائه شده است.

جدول ۱- مشخصات سه نوع فوم مختلف

فوم	وزن ۱ واحد از فوم (gr)	نیاز به آب	کف تولیدی (kg)	پایداری کف
۱- فوم پروتئینی نوع A	۶۰	۳۳ واحد	۱/۶۵۰	۴۵ دقیقه
۱- فوم پروتئینی نوع B	۶۵	۳۳ واحد	۱/۶۶۵	۴۰ دقیقه
۳- فوم شیمیایی نوع A	۶۰	۲۰-۵۰ واحد	۰/۸۴۵ ~ ۲/۳	۵ الی ۱۰ دقیقه

در این تحقیق از فوم پروتئینی نوع B برای ساخت نمونه های آزمایشگاهی استفاده شده است. مصالح بکار رفته در طرح اختلاط بتن شاهد که مبنای مقایسه با سایر نمونه ها قرار گرفته عبارتست از ماسه 1235 kg/m^3 ، سیمان 35 kg/m^3 ، $w/c=0.57$ ، کف $1/m^3$ برای انجام بررسیهای آزمایشگاهی نمونه های بتنی با ابعاد $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}$ مورد استفاده قرار گرفت که نمونه ای از آن در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱- نمونه بتن فومی با کف پروتئینی

تأثیر نسبتهای آب، سیمان و ماسه بر خصوصیات بتن فومی

به طور کلی میزان آب مصرفی در این بتن زیاد بوده و بین $w/c = 0.7 \sim 0.4$ می باشد. دلیل این امر آن است که این بتن دارای درصد بالایی ریزدانه بوده که بطور طبیعی مصرف آب را در طرح اختلاط بالا می برد. اگر درصد آب در طرح اختلاط کم در نظر گرفته شود، مخلوط کمبود آب خود را از فوم جبران می نماید که در نتیجه آن فوم از بین رفته و وزن حجمی بتن نیز افزایش می یابد. همچنین باید به این نکته توجه داشت که بالا بودن درصد آب مصرفی در طرح اختلاط باعث افزایش درصد افت و انقباض بتن خواهد شد. به عبارت دیگر کنترل درصد آب مصرفی در طرح اختلاط بتن فومی از اهمیت بالایی برخوردار است.

در مورد نسبت ماسه به سیمان آزمایش های زیادی توسط محققین انجام شده است [۱-۶]. معمولاً جهت حصول به چگالی های پایین (حدود 300 kg/m^3) از سیمان به تنهایی در طرح اختلاط استفاده می شود و ماسه بکار نمی رود. برای حصول چگالی های بالاتر و نیز مقاومت فشاری بیشتر نسبت ماسه به سیمان افزایش می یابد. به طور کلی از نسبتهای یک، نیم و یک سوم (سیمان به ماسه) استفاده شده است [۵-۶]. طبق آزمایشات انجام شده عیار سیمان کمتر از 300 kg/m^3 استفاده نمی گردد زیرا عیار کمتر افت شدید مقاومت را بدنبال خواهد داشت. همچنین طبق نتایج آزمایشات انجام شده عیار سیمان بیشتر از 450 kg/m^3 تأثیر قابل توجهی بر مقاومت نهایی بتن فومی ندارد [۲-۴].

**بررسی اثر نانوذرات سوخته سبوس برنج بر بتن فومی**

سوخته سبوس برنج که در دمای در دمای ۴۰۰ درجه سانتیگراد تهیه شده باشد دارای درصد بالایی از SiO_2 (حدوداً ۹۰٪) می باشد که در ساخت ژل C-S-H شرکت می کند. در این تحقیق سبوس برنج در دمای ۴۰۰ درجه سانتیگراد تهیه و به مدت ۳۰ دقیقه در دستگاه لوس آنجلس آسیاب گردید و سپس از الک شماره ۱۰۰ عبور داده شد. به منظور بررسی اثر نانو ذرات سوخته سبوس برنج بر خاصیت جذب آب بتن فومی، درصدهای مختلف سبوس جایگزین سیمان در طرح اختلاط شد. نمونه های بتنی ساخته شده به مدت ۲۸ روز در آب عمل آوری و سپس درصد جذب آب نمونه اندازه گیری گردید. نتایج بدست آمده در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول ۲- تاثیر سوخته سبوس برنج بر خاصیت جذب آب بتن فومی

f'_c kg/cm ²	درصد جذب آب	وزن نمونه خشک gr	وزن نمونه اشباع gr	درصد سبوس جایگزین سیمان
۴/۲	۲۶٪	۱۱۵	۱۴۵	۰٪
۱۶	۱۸/۷٪	۱۶۰	۱۹۰	۱۰٪
۱۶	۱۳/۲٪	۱۷۰	۱۹۲/۵	۲۰٪
۲/۶	۸/۶٪	۱۷۵	۱۹۰	۳۰٪
۲۱/۶	۱۵/۶٪	۱۶۰	۱۸۵	۳۵٪
۴/۴	۱۹/۳۵٪	۱۵۵	۱۸۵	۴۰٪

همانگونه که نتایج ارائه شده در جدول (۲) نشان می دهد با افزایش درصد سوخته سبوس برنج در طرح اختلاط، درصد جذب آب کاهش و مقاومت فشاری بتن فومی افزایش می یابد. اما این روند صعودی تا درصد بهینه ای ادامه دارد و پس از آن مقادیر مقاومت فشاری کاهش یافته و درصد جذب آب افزایش می یابد. نکته قابل مشاهده در حین انجام این سری از آزمایشات، کاهش کارایی مخلوط با افزایش درصد سوخته سبوس بود. با ساخت یک سری مخلوط، در این ارتباط مشاهده گردید که جهت حفظ کارایی مخلوط لازم است به ازای هر ۱۰ درصد افزایش میزان سوخته سبوس ۲۵ درصد میزان آب مخلوط را افزایش داد.

با هدف حفظ کارایی بتن، آزمایشات این مرحله با نسبتهای مختلف W/C تکرار گردید و ملاحظه شد که با نسبت $W/C = .۱۶$ و درصد جایگزینی سوخته سبوس برنج به میزان ۲۰٪ بالاترین مقاومت فشاری و کمترین درصد جذب آب حاصل می گردد.

بررسی اثر پرلیت بر خواص بتن فومی

پرلیت ماده ای آتش فشانی است که طی فرایندهای حرارتی بصورت ریزدانه بسیار سبک تولید می گردد. در این مطالعه از دو نوع پرلیت دانه ای (رد) شده از الک #۴ و مانده الک #۱۲) و پرلیت غباری استفاده شد. تاثیر بکارگیری این دو نوع پرلیت بر درصد جذب آب و مقاومت فشاری بتن فومی بررسی گردید. نتایج این بخش از آزمایشات در جدول (۳) ارائه شده است.

جدول ۳- نتایج کاربرد پرلیت غباری در بتن فومی

f'_c kg/cm ²	درصد جذب آب	وزن خشک نمونه (gr)	وزن اشباع نمونه (gr)	درصد پرلیت غباری جایگزین ماسه
۱۲/۴	۱۸/۴	۱۵۲	۱۸۰	۱۰
۳۰	۹	۱۷۹	۱۹۵	۲۰
۲۳	۱۴	۱۶۲	۱۸۵	۳۰
۲۴	۱۸/۴	۱۵۲	۱۸۰	۴۰

بر اساس نتایج ارائه شده در جدول (۳) مشاهده می گردد که تاثیر درصد مصرفی پرلیت غباری بر خاصیت جذب آب و مقاومت فشاری نمونه های بتن فومی متغیر بوده و می توان بر اساس نتایج حاصله درصد بهینه ای به میزان ۲۰٪ را که کمترین درصد جذب آب و بیشترین میزان مقاومت فشاری را سبب شده است برای مصرف پرلیت مدنظر قرار داد. این درصد بهینه برای پرلیت دانه ای به میزان ۳۰٪ بدست آمد، جدول (۴).



جدول ۴- نتایج کاربرد پرلیت دانه ای در بتن فومی

σ_{kg/m^2}	درصد جذب آب	وزن خشک نمونه gr	وزن اشباع نمونه gr	درصد پرلیت دانه ای جایگزین ماسه
۵/۶	۲۰/۴	۱۰۸	۱۳۰	۱۰
۱۲/۸	۱۹/۲	۱۳۰	۱۵۵	۲۰
۳۲/۴	۱۰/۷	۱۴۰	۱۵۵	۳۰
۳۲/۸	۱۴	۱۲۷	۱۴۵	۴۰

بررسی رابطه مقاومت بتن فومی با نسبت های مختلف w/c

به منظور بررسی تاثیر نسبتهای مختلف w/c بر خصوصیات بتن فومی یک سری آزمایش با شرایط زیر انجام گردید. خصوصیات طرح اختلاط بتن فومی در این سری از آزمایشات بدین شرح بود: عیار سیمان 450 kg/m^3 ، ماسه 380 kg/m^3 ، نسبت w/c برابر ۰/۴، ۰/۵ و ۰/۵۵ و میزان کف برابر $1/3 \text{ l/m}^3$ بکار برده شد. همچنین لازم به ذکر است که چگالی هدف در این سری تست ها در محدوده $1600 \sim 1400 \text{ kg/m}^3$ در نظر گرفته شد. نتایج آزمایش مقاومت فشاری ۷ روزه نمونه های مکعبی $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}$ در جدول (۵) ارائه شده است.

جدول ۵- اثر w/c بر خواص فوم بتن فومی

w/c	وزن اشباع نمونه gr	وزن خشک نمونه gr	$f'_c \text{ kg/cm}^2$	درصد جذب آب	فوم مصرفی l/m^3
۰/۴	۲۳۰	۲۰۷	۱۰۸	٪۱۱	۱/۳
۰/۵	۲۱۷	۱۷۵	۷۳/۴	٪۱۴	۱/۳
۰/۵۵	۲۳۳	۱۹۶	۷۰	٪۱۸/۸	۱/۳

بطوریکه نتایج ارائه شده در جدول نشان می دهد با افزایش نسبت w/c مقاومت فشاری کاهش می یابد و درصد جذب آب بالا می رود. در این سری از آزمایشات با $w/c = 0.5$ و مقدار کف برابر $1/3 \text{ l/m}^3$ بالاترین مقاومت فشاری حاصل شده است. به منظور بررسی تاثیر میزان کف بر خصوصیات بتن فومی آزمایشات فوق با مقادیر مختلف کف برابر ۱/۳، ۱/۱ و ۰/۹۵ لیتر در متر مکعب و با جایگزینی پودر سنگ بجای ماسه در طرح اختلاط تکرار گردید که نتایج در جدول (۶) ارائه شده است.

جدول ۶- اثر w/c و میزان کف مصرفی بر خواص بتن فومی با پودر سنگ

w/c	وزن اشباع نمونه gr	وزن خشک نمونه gr	$f'_c \text{ kg/cm}^2$	درصد جذب آب	فوم مصرفی l/m^3
۰/۴	۲۴۵	۲۳۷	۱۱۸	٪۳/۴	۱/۳
۰/۵	۲۴۲	۲۳۳	۸۷	٪۳/۹	۱/۳
۰/۵۵	۲۱۰	۲۰۰	۶۲	٪۵	۱/۳
۰/۴	۲۴۳	۲۳۰	۱۵۰	٪۵/۶	۱/۱
۰/۵	۲۱۵	۲۰۰	۵۱/۲	٪۷/۵	۱/۱
۰/۵۵	۲۰۷	۱۹۵	۴۴	٪۶/۲	۱/۱
۰/۴	۲۵۰	۲۳۰	۱۵۳/۶	٪۸/۷	۰/۹۵
۰/۵	۲۳۰	۲۰۸	۶۵/۸	٪۱۰/۵	۰/۹۵
۰/۵۵	۲۳۵	۲۱۵	۸۴	٪۹/۳	۰/۹۵

بر اساس نتایج بدست آمده ملاحظه می شود که با افزایش میزان کف درصد جذب آب کاهش می یابد و همچنین با کاهش میزان کف مصرفی در $w/c = 0.4$ بالاترین مقاومت فشاری بدست می آید. در رابطه با میزان w/c می توان گفت که در اکثر نمونه ها با افزایش این پارامتر وزن حجمی بتن و مقاومت فشاری کاهش می یابد و بهینه ترین حالت از لحاظ درصد جذب آب و مقاومت فشاری مربوط به $w/c = 0.4$ و $1/1 \text{ l/m}^3$ فوم می باشد. با مقایسه نتایج ارائه شده در جداول (۷) و (۸) چنین می توان نتیجه گرفت که جهت کاهش میزان جذب آب و افزایش مقاومت فشاری استفاده از ریزدانه پودر سنگ می تواند کاملاً موثر باشد.

بررسی اثر عیار سیمان مصرفی بر مقاومت فشاری و چگالی بتن

به منظور بررسی اثر عیار سیمان در طرح اختلاط بر وزن حجمی و مقاومت فشاری بتن فومی، یک سری نمونه مکعبی با ابعاد $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}$ با مقادیر مختلف عیار سیمان برابر با 300 ، 350 ، 400 ، 450 ، 500 kg/m^3 ساخته شد و پس از ۷ روز عمل آوری در آب تحت تست مقاومت فشاری



قرار گرفت. در این مرحله از آزمایشات در طرح اختلاط بتن فومی از فوم به میزان $1/3 \text{ l/m}^3$ استفاده گردید. همچنین یک سری از نمونه ها با استفاده از ماسه بادی به میزان 380 kg/m^3 و سری دیگر نمونه ها با استفاده از پودر سنگ به میزان 380 kg/m^3 ساخته شد. نتایج مقاومت فشاری نمونه های ساخته شده در جدول (۷) ارائه شده است.

جدول ۷- تاثیر عیار سیمان بر مقاومت فشاری ۷ روزه بتن فومی

$f'_c \text{ kg/cm}^2$ (پودر سنگ)	$f'_c \text{ kg/cm}^2$ (ماسه)	وزن حجمی با پودر سنگ (kg/m^3)	وزن حجمی با ماسه (kg/m^3)	سیمان (kg/m^3)
۸/۲	۷	۸۲۵	۸۱۰	۳۰۰
۱۳	۱۳/۲	۸۹۳	۸۶۲	۳۵۰
۲۳	۱۶	۹۰۵	۸۵۵	۴۰۰
۲۷	۱۷/۳	۱۰۶۳	۸۶۸	۴۵۰
۲۸/۶	۱۶/۸	۱۰۹۴	۸۹۸	۵۰۰

در انجام آزمایشات انتظار می رفت که با افزایش عیار سیمان میزان مقاومت فشاری بتن فومی نیز بطور مناسب افزایش یابد. در مورد بتن فومی با ماسه بادی، بطوریکه نتایج ارائه شده در جدول (۷) نشان می دهد، مقاومت فشاری نمونه های بتنی با افزایش عیار سیمان از مقدار 300 kg/m^3 به 450 kg/m^3 افزایش یافته و سپس با افزایش عیار سیمان به 500 kg/m^3 ، مقاومت فشاری به میزان ناچیز $2/9\%$ کاهش یافته است که نتایج حاصله به نوعی حداکثر عیار موثر را در این طرح اختلاط نشان می دهد. در مورد بتن فومی با پودر سنگ بنظر می رسد مقدار بهینه عیار سیمان در طرح اختلاط به میزان 450 kg/m^3 می باشد.

نتیجه گیری

در این مطالعه، بررسی پارامترهای مختلفی بر خواص بتن فومی مورد مطالعه قرار گرفت که بر اساس نتایج بدست آمده می توان موارد زیر را بعنوان نتیجه گیری مطرح نمود:

- برای ساخت بتن فومی غیر سازه ای و سازه ای به ترتیب استفاده از فوم با پایه پروتئینی و فوم با پایه شیمیایی توصیه می شود.
- استفاده از نانو ذرات سوخته سبوس برنج، بدلیل دارا بودن منبع غنی SiO_2 سبب افزایش مقاومت فشاری بتن فومی و کاهش عیار سیمان به ازای یک مقاومت مشخص می گردد.
- کاربرد 20 الی 30 درصد پرلیت در طرح اختلاط بتن فومی سبب کاهش وزن حجمی و نیز کاهش درصد جذب آب بتن فومی می گردد.
- در ساخت بتن فومی سازه ای، بکارگیری ماسه و پودر سنگ در طرح اختلاط توصیه می شود. بر اساس نتایج حاصله در این تحقیق، بکار بردن پودر سنگ سبب افزایش مقاومت فشاری به میزان بیشتری نسبت به ماسه در طرح اختلاط می گردد.
- نتایج بدست آمده در این تحقیق نشان می دهد که استفاده از سیمان با عیاری بالاتر از 450 kg/m^3 در طرح اختلاط تاثیر قابل توجهی در افزایش مقاومت فشاری نخواهد داشت.
- در آزمایشهای انجام شده در این تحقیق، نمونه های بتن فومی در آب عمل آوری شدند که احتمال دارد تغییر روش عمل آوری بر نتایج مقاومت فشاری نیز اثر بگذارد که این موضوع در ادامه این مطالعه در حال بررسی می باشد.

مراجع

- 1-Ravindra K. Dhir , Moray D. New lands and Aikaterini MC Carthy (2005) Use of foamed concrete in construction .Proceeding of International Conference of Global Construction.
- ۲- محمد صیامی (۱۳۸۴) مرکز تحقیقات مهندسی آذربایجان شرقی معرفی بتن سبک اسفنجی از نوع کفی به عنوان مصالحی با قابلیت های بالا
- 3- Papayianni I. (1987) .An investigation on the pozzolinitiy and hydraulic reactivity of a high calcium fly ash, Magazine of Concrete Research , Vol. 39, No. 38, pp 19-28
- 4- Amer, A.A. (1997) Rice husk as pozzolanic cement, Silicates Industrials, Vol 62, pp 141-147.
- 5- Privenko, P.V. (2002) Heat-Resistant fly ash based geocements. Proceeding of the Intern Conf. Geopolymers, pp 1234-1241.
- 6- Pushkareva E.K. (2004). Heat-Resistant alkaline binders. Proceeding of First Int. Conf. on Alkaline Cement., Kiev, pp. 245-256.
- 7- Tarasova A.P., (2003) Heat –Resistant cellular concretes. Studies in the field of Heat-Resistant Concrete, Moskow, pp 80-90.