



کد مقاله: ۱-۱۷۱

بررسی دوام فوم بتن با چگالی‌های متفاوت در برابر سیکل‌های یخبندان و ذوب یخ

منصور قلعه نوی^۱، ندا بقیعی^۲، علی قیامی^۳، یحیی احمدی^۴

۱- عضو هیأت علمی، دانشگاه فردوسی مشهد

۲- عضو هیأت علمی، دانشگاه مهندسی‌های فناوری نوین قوچان

۳- عضو هیأت علمی، دانشگاه اقبال لاهوری مشهد

۴- کارشناسی ارشد، دانشگاه اقبال لاهوری مشهد، y.ahmadi1985@gmail.com

چکیده

بتن به عنوان یکی از مهم‌ترین مصالح ساختمانی قرن حاضر و پرمصرف‌ترین ماده پس از آب و به ویژه بتن‌های سبک در صنعت ساخت و ساز روز به روز گسترش می‌یابد. هدف از این پژوهش، بررسی دوام فوم بتن با چگالی‌های متفاوت در برابر سیکل‌های یخبندان و ذوب یخ و در نهایت تشخیص این مطلب که در کدام محدوده‌ی چگالی فوم بتن می‌تواند در معرض مستقیم عوامل جوی و سیکل یخبندان قرار گیرد، می‌باشد. مصالح مصرفی در این آزمایش در محدوده‌ی استاندارد ASTM قرار دارد و شامل سیمان تیپ II بجنورد، ماسه بادی، فوم پروتئینه AK-350، الیاف پلی-پروپیلن و آب می‌باشد. در این آزمایش نسبت آب به سیمان نمونه‌ها ۰/۴~۰/۵، نسبت ماسه بادی به سیمان ۰/۸۳~۰/۱۷، میزان فوم و الیاف ۱ الی 4 Kg/m^3 می‌باشد. مطابق استاندارد ASTM C 666-84 که یخبندان و ذوب هر دو در مجاورت آب انجام می‌پذیرد تعدادی نمونه مورد آزمون یخبندان و ذوب قرار گرفتند و مقاومت فشاری، میزان جذب آب، وزن خشک نمونه‌ها قبل و بعد از ۶۰ و ۱۲۰ سیکل یخبندان که دمای انجماد 17°C - و دمای ذوب 4°C + اندازه‌گیری گردید، مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. طبق استاندارد درصد افت وزن، درصد افت مقاومت فشاری و پوسته شدن و شکل ابعادی نمونه‌ها بعد از ۶۰ و ۱۲۰ سیکل یخبندان معیارهای ارزیابی فوم بتن مدنظر قرار گرفته شده است. برای تجزیه و تحلیل مشاهدات و بررسی تأیید یا رد فرضیات تحقیق، از روش آماری آنالیز واریانس توسط نرم‌افزار SPSS استفاده شده است. تنها چگالی‌های ۹۰۰، ۱۰۰۰ و 1100 Kg/m^3 پس از ۱۲۰ سیکل یخبندان دچار پوسته شدن رویه نمونه شده‌اند. با توجه به این موضوع برای استفاده از فوم بتن که در معرض سیکل یخبندان قرار دارد باید چگالی‌هایی در محدوده‌ی ۱۱۰۰ الی 1600 Kg/m^3 مورد استفاده گیرند.

کلمات کلیدی: بتن‌های سبک فومی، بتن سبک، فوم بتن، سیکل یخبندان و ذوب یخ، مقاومت فشاری، دوام بتن سبک

مقدمه

امروزه استفاده از بتن‌های سبک به دلیل مزایایی چون کاهش بار مرده‌ی سازه‌ها، خصوصیات حرارتی و صوتی و مقاومت فشاری قابل قبول از سوی دست‌اندرکاران صنعت ساختمان، رو به رشد است. یکی از انواع این بتن‌ها بتن سبک با ساختار سلولی از نوع بتن فومی یا بتن کفی است. این بتن در اواخر جنگ جهانی دوم توسط سوئدی‌ها 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 می‌گرفته است [۲ و ۱]. به هر جهت بتن فومی علاوه بر مزایای مذکور دارای مزایای منحصر به خود است که استفاده از آن را روز به روز با استقبال بیشتری روبه‌رو نموده است. اهم این مزایا عبارت‌اند از عدم نیاز بتن فومی به کارگاه و تجهیزات پیچیده و امکان تولید ساده آن با یک دستگاه فوم‌ساز و همزن در سایت، نیاز به سرمایه‌گذاری اولیه کم و عدم نیاز به استفاده از مواد، سنگ‌دانه و افزودنی‌های خاص در طرح اختلاط آن. در واقع مصالح موردنیاز بتن فومی تقریباً همان مصالح ریزدانه مصالح یک بتن معمولی است [۳].

مواد مصرفی

۱. **سیمان:** از آنجاکه کیفیت سیمان در تولید یک بتن خوب بسیار مؤثر است باید در انتخاب سیمان دقت نظر داشت [۴-۵]. در این پژوهش از سیمان تپ II بجنورد استفاده شد.
۲. **فوم مصرفی:** فوم استفاده‌شده در آزمایش AK350 نام دارد. این فوم پروتئینه بوده که بر پایه ترکیبات پروتئینه تولید می‌شود. AK350 سازگاری بسیار مناسبی با ترکیبات سیمان دارد. لازم به ذکر است حباب‌های تولیدی با فوم پروتئینه بسیار فشرده، ریز و یکنواخت بوده و آب موجود در حباب به‌سختی جدا می‌شود. لذا کیفیت بتن تولیدی از سطح مطلوب‌تری نسبت به فوم شیمیایی برخوردار می‌باشد [۶].
۳. **الیاف:** الیاف پلی‌پروپیلن باعث جلوگیری از آب انداختگی فوم بتن شده و از انتقال آب به سطح فوم بتن جلوگیری می‌کند که نتیجه‌ی آن همگن شدن فوم بتن و یکسان‌سازی نسبت آب به سیمان در تمام فوم بتن و تداوم عمل هیدراتاسیون می‌باشد. این الیاف نفوذپذیری سطح فوم بتن را کاهش داده و موجب افزایش عمر فوم‌بتن شده و لذا سطح بتن دچار خردشدگی و ورقه شدن نمی‌شود.
۴. **ماسه بادی:** ماسه بادی مطابق دانه‌بندی ASTM C33 با مدول نرمی ۲/۹ و چگالی ۲/۵۷ و درصد جذب آب ۰/۹ می‌باشد [۷].

معیارها و استانداردهای سنجش برای تخریب نمونه‌ها در معرض چرخه یخبندان

- پس از انجام آزمایش‌های چرخه یخبندان و ذوب یخ میزان تخریب نمونه‌ها با معیارهای مختلفی سنجیده می‌شود که شامل موارد زیر است [۸]:
۱. تغییر در مقاومت فشاری: اگر افت مقاومت فشاری بیشتر از ۱۰٪ باشد، نشان‌دهنده تخریب نمونه است.
 ۲. تغییر در وزن نمونه: اگر افت وزن بیشتر از ۵٪ باشد، نشان‌دهنده تخریب نمونه است.
 ۳. تغییر در پاسخ امواج: با عبور امواج ماورای صوت از نمونه در قبل و بعد از آزمایش اگر به میزان ۴۰٪ افت در سرعت امواج عبوری مشاهده شد، نمونه تخریب‌شده است.

۴. تغییر در طول ابعادی نمونه: کرنش‌های نمونه با ابزارهای دقیق سنجیده می‌شود در صورتی که از مقادیر توصیه‌شده تجاوز نکند (این مقادیر در مرجع‌های گوناگون و به ازای بتن‌های مختلف متفاوت است)، نمونه به حالت تخریب رسیده است.

۵. تغییر ضریب کشسانی دینامیکی: افت ضریب کشسانی دینامیکی تا ۶۰٪ مقدار اولیه‌اش نشان‌دهنده تخریب است [۹].

در این مقاله موارد ۱ و ۲ مورد بررسی دقیق قرار گرفته است.

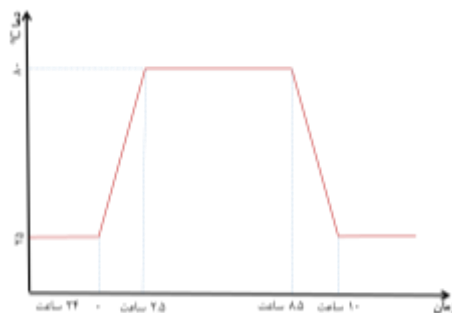
در این آزمایش نسبت آب به سیمان نمونه‌ها ۰/۴~۰/۵، نسبت ماسه بادی به سیمان ۰/۸۳~۱/۱۷، میزان فوم و الیاف ۱ الی 4 Kg/m^3 می‌باشد. طرح اختلاط نمونه‌ها در جدول ۱ مشاهده می‌شود.

جدول ۱: طرح اختلاط نمونه‌های آزمایش

وزن سیمان (Kg)	وزن آب (Kg)	وزن ریزدانه (Kg)	وزن فوم (Kg)	وزن الیاف (Kg)	W/C	S/D	چگالی بتن تازه (fc)
400	160	335	4	1	0.4	0.83	900
425	170	400	3.5	1.5	0.4	0.94	1000
450	225	420	3.5	1.5	0.5	0.93	1100
450	225	520	3	2	0.5	1.15	1200
500	250	545	3	2	0.5	1.09	1300
555	250	590	2.5	2.5	0.45	1.07	1400
570	275	650	2	3	0.48	1.14	1500
595	300	700	1	4	0.5	1.17	1600

ساخت و عمل‌آوری نمونه‌ها

نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت درون قالب‌ها نگهداری و عمل‌آوری مرطوب آن بلافاصله پس از گرفتن بتن آغاز شد. بعد از باز شدن قالب‌ها از آنجا که افزایش دمای بتن در مرحله‌ی عمل‌آوری، سبب تسریع در روند رشد و کسب مقاومت آن می‌شود، روش عمل‌آوری بتن با بخار به کار می‌رود. مدت مرحله‌ی تأخیر ۲۴ ساعت انتخاب شده که در شرایط عمل‌آوری مرطوب و معمولی قرار دارد. زیرا اگر زودتر از ۲۴ ساعت نمونه‌ها در معرض بخار قرار بگیرند، فوم موجود در بتن شروع به واکنش کرده و بتن از هم می‌پاشد و به شکل خمیر در می‌آید. دمای بخار با شدت ۳۰ درجه سانتی‌گراد در هر ساعت افزایش داده شده و در دمای حداکثر ۸۰ درجه سانتی‌گراد تثبیت می‌شود. این فرآیند ۱۰ ساعت به طول می‌انجامد که ۲/۵ ساعت از آن مربوط به مدت زمان رسیدن به حداکثر دما می‌باشد و ۶ ساعت دیگر زمانی است که نمونه‌ها در شرایط حداکثر دمای بخار قرار دارند و سپس شیرهای بخار بسته شده و نمونه‌ها قبل از آنکه وارد مرحله‌ی خنک‌سازی شوند، مدتی را در دما و رطوبت باقی‌مانده از مرحله‌ی افزایش دما سپری کرده و سرانجام مرحله‌ی خنک‌سازی بتن به صورت تدریجی و ملایم آغاز می‌شود [۹ و ۱۰] (شکل ۱).



شکل ۱: نمونه‌ای از یک چرخه عمل‌آوری فوم‌بتن با بخار

آزمایش‌ها و نتایج

فرآیند تولید فوم بتن اندکی با فرآیند تولید بتن معمولی تفاوت دارد. تولید نمونه‌های فوم بتن و رسیدن به چگالی دقیق کار بسیار دشواری است و دلیل آن وجود فوم و رفتار پیچیده‌ی این ماده در طرح اختلاط می‌باشد. پس از چندین بار آزمون و خطا در هر مرحله چگالی بتن تازه مورد نظر به دست می‌آید. برای بررسی دوام فوم بتن در برابر چرخه یخبندان و ذوب یخ ۲۴ نمونه ساخته شده که این ۲۴ نمونه به ۸ گروه ۳ تایی تقسیم می‌شود که چگالی آن‌ها از ۹۰۰ تا 1600 kg/m^3 می‌باشد. از هر چگالی ۳ نمونه با طرح اختلاط و شرایط ساخت مشابه تولید می‌شود.

در این بررسی نام‌گذاری نمونه‌ها در گروه‌های سه‌گانه به شکل زیر است:

fc مخفف فوم بتن، عدد بعد از این حروف معرف چگالی بتن تازه بر حسب kg/m^3 می‌باشد.

عدد بعد از - نشان‌دهنده‌ی تعداد چرخه‌های یخبندان و ذوب می‌باشد.

حرف N نشان‌دهنده نمونه‌های شاهد می‌باشد که پس از ۲۸ روز مورد آزمایش قرار گرفته‌اند.

چگالی بتن تازه نمونه‌ها در جدول ۲ ذکر شده است.

جدول ۲: چگالی‌های دقیق بتن تازه‌ی نمونه‌های ساخته شده

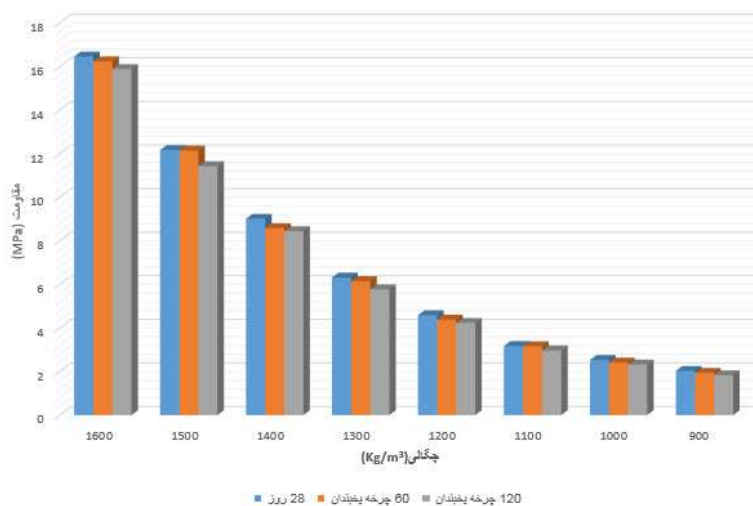
	fc900	fc1000	fc1100	fc1200	fc1300	fc1400	fc1500	fc1600
N	917	989	1100	1215	1305	1395	1520	1620
60	917	991	1105	1210	1275	1395	1500	1610
120	917	1000	1110	1195	1300	1390	1505	1610

مقاومت فشاری و درصد افت نمونه‌های گروه‌های سه‌گانه که شامل بتن‌های شاهد fc-N که پس از ۲۸ روز و نمونه‌های fc-60 که پس از ۶۰ چرخه یخبندان و ذوب یخ و نمونه‌های fc-120 که پس از ۱۲۰ چرخه یخبندان و ذوب یخ مورد آزمایش قرار گرفته‌اند در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳: مقاومت و درصد افت مقاومت نمونه‌های fc..._120 و fc..._60 و fc..._N

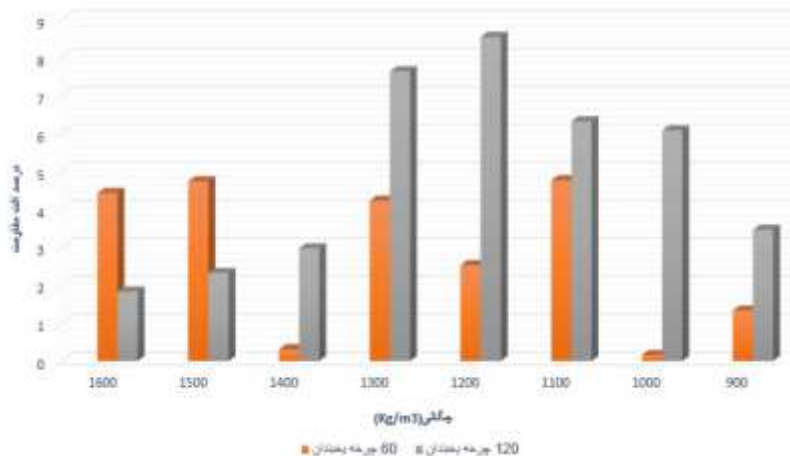
درصد افت مقاومت پس از ۱۲۰ چرخه	مقاومت پس از ۱۲۰ چرخه یخبندان (Mpa)	درصد افت مقاومت پس از ۶۰ چرخه	مقاومت پس از ۶۰ چرخه یخبندان (Mpa)	مقاومت ۲۸ روزه (Mpa)
3.46	15.88	1.33	16.23	fc1600_N 16.45
6.08	11.42	0.16	12.14	fc1500_N 12.16
6.32	8.44	4.77	8.58	fc1400_N 9.01
8.55	5.77	2.53	6.15	fc1300_N 6.31
7.64	4.23	4.36	4.38	fc1200_N 4.58
6.3	2.97	0.31	3.16	fc1100_N 3.17
8.3	2.32	4.74	2.41	fc1000_N 2.53
9.85	1.83	4.43	1.94	fc900_N 2.03

نمودار مقایسه‌ای مقاومت فشاری برای نمونه‌های ذکر شده در جدول ۳ در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲: نمودار مقایسه‌ی مقاومت فشاری نمونه‌های مختلف

همان‌طور که در نمودار شکل ۲ مشاهده می‌شود کمترین میزان مقاومت فشاری مربوط به نمونه‌های fc-900 می‌باشد و بیشترین مقاومت مربوط به نمونه‌های fc-1600 می‌باشد. نمودار به‌صورت نزولی است که با کاهش چگالی نمونه‌ها مقاومت فشاری کاهش می‌یابد و با افزایش تعداد چرخه یخبندان مقاومت فشاری نمونه‌ها کاهش می‌یابد.



شکل ۳: نمودار مقایسه درصد افت مقاومت فشاری نمونه‌های مختلف پس از چرخه‌های ۶۰ و ۱۲۰ یخبندان

همان‌طور که در نمودار شکل ۳ مشاهده می‌شود کمترین درصد افت مقاومت فشاری مربوط به نمونه‌ی fc1500-60 و بیشترین درصد افت مربوط به نمونه fc900-120 می‌باشد. تمامی درصدهای افت مقاومت نمونه‌ها پس از ۶۰ و ۱۲۰ چرخه یخبندان کمتر از ۱۰٪ می‌باشند که بیانگر این موضوع است که هیچ‌کدام از نمونه‌ها تخریب نشده‌اند.

بررسی درصد افت وزن نمونه‌ها

نتایج ثبت شده وزن خشک نمونه‌های fc-N، fc-60 و fc-120 و درصد افت وزن آن‌ها که توسط معادله ا به دست می‌آید در جدول ۴ ذکر شده است [۱۰].

= درصد افت وزن پس از چرخه یخبندان

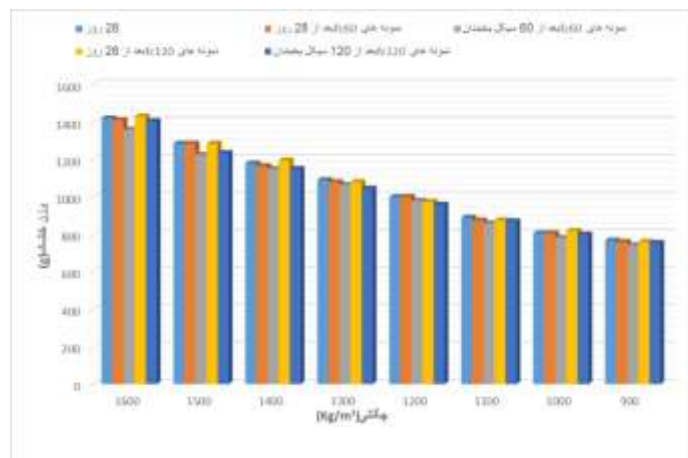
(۱)

وزن خشک نمونه‌های ۲۸ روزه / ۱۰۰ × (وزن خشک نمونه‌ها پس از n چرخه - وزن خشک نمونه‌های ۲۸ روزه)

جدول ۴: نمودار وزن خشک و درصد افت وزن خشک نمونه‌های fc-N، fc-60 و fc-120

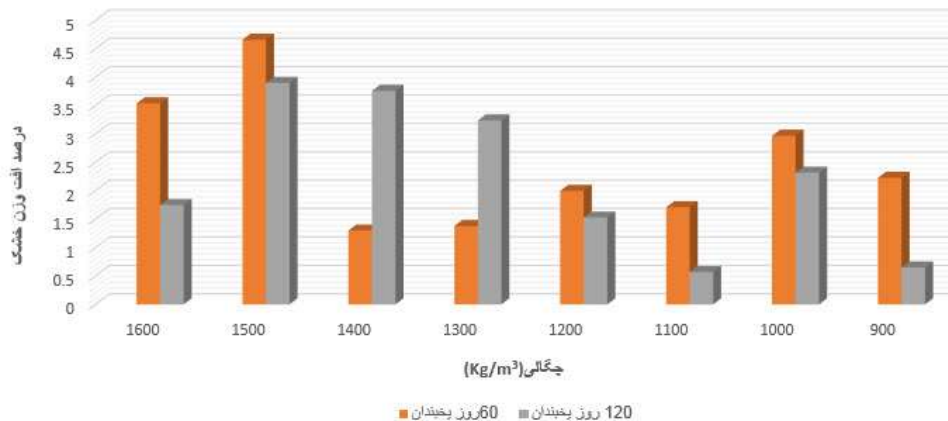
درصد افت وزن پس از ۱۲۰ چرخه یخبندان	وزن خشک نمونه‌ها پس از ۱۲۰ چرخه یخبندان (gr)		وزن خشک نمونه‌های fc_120 پس از ۲۸ روز (gr)		درصد افت وزن پس از ۶۰ چرخه یخبندان	وزن خشک نمونه‌ها پس از ۶۰ چرخه یخبندان (gr)		وزن خشک نمونه‌های fc_60 پس از ۲۸ روز (gr)		وزن خشک نمونه‌های fc_N پس از ۲۸ روز (gr)	
	1.75	1405	fc1600_120	1430		fc1600_120	3.54	1360	fc1600_60	1410	fc1600_60
3.9	1235	fc1500_120	1285	fc1500_120	4.66	1225	fc1500_60	1285	fc1500_60	1285	fc1500_N
3.76	1150	fc1400_120	1195	fc1400_120	1.3	1150	fc1400_60	1165	fc1400_60	1180	fc1400_N
3.24	1045	fc1300_120	1080	fc1300_120	1.38	1065	fc1300_60	1080	fc1300_60	1090	fc1300_N
1.53	960	fc1200_120	975	fc1200_120	2	980	fc1200_60	1000	fc1200_60	1000	fc1200_N
.57	870	fc1100_120	875	fc1100_120	1.71	860	fc1100_60	875	fc1100_60	890	fc1100_N
2.32	800	fc1000_120	819	fc1000_120	2.97	782	fc1000_60	806	fc1000_60	806	fc1000_N
.65	755	fc900_120	760	fc900_120	2.23	743	fc900_60	760	fc900_60	767	fc900_N

نمودار مقایسه‌ای وزن خشک برای نمونه‌های ذکر شده در جدول ۵، در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴: نمودار وزن خشک نمونه‌ها پس از چرخه‌های یخبندان و ذوب

همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود پس از قرار گرفتن نمونه در چرخه یخبندان نمونه‌ها با کاهش وزن مواجه می‌شوند. بیشترین وزن خشک مربوط به نمونه fc1600-120 بعد از ۲۸ روز و کمترین وزن خشک مربوط به fc900-120 پس از ۱۲۰ چرخه یخبندان می‌باشد. نمودار مقایسه‌ی درصد افت وزن خشک برای نمونه‌های ذکر شده در جدول ۵ در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵: نمودار مقایسه‌ی درصد افت وزن خشک نمونه‌های مختلف پس از چرخه‌های یخبندان و ذوب

بررسی نمونه‌ها از لحاظ شکل ظاهری

۱. شکل ظاهری نمونه‌ها پس از ۶۰ چرخه یخبندان: در بین نمونه‌ها ترک‌هایی بر روی نمونه‌های fc900-60 و fc1000-60 مشاهده شده است (شکل ۶ الف).
۲. شکل ظاهری نمونه‌ها پس از ۱۲۰ چرخه یخبندان: در بین نمونه‌ها سطح روی نمونه‌های fc1000-120، fc900-120 و fc1100-120 پوسته پوسته شده‌اند و از لحاظ شکل ابعادی و پوسته شدن، تخریب شده محسوب می‌گردند (شکل ۶ ب).



شکل ۶: الف) ترک ناشی از ۶۰ چرخه یخبندان بر روی نمونه fc-900-60. ب) پوسته شدن سطح روی نمونه‌های fc1000-120، fc900-120، fc1100-120

نتیجه گیری

هدف از این پژوهش بررسی واکنش فوم بتن در برابر چرخه یخبندان از نظر مقاومت فشاری، کاهش وزن و شکل ظاهری و همچنین تعیین محدوده‌ی مناسبی از چگالی فوم بتن برای قرارگیری در دیواره‌های خارجی که در معرض مستقیم با هوا و شرایط جوی است، می‌باشد. برای دستیابی به این هدف آزمایش‌هایی بر روی نمونه‌هایی با چگالی‌های ۹۰۰ الی 1600 kg/cm^3 صورت پذیرفت که نتایج خوبی کسب شد. بر اساس نتایج به دست آمده برای مقاومت فشاری و درصد افت مقاومت کلیه نمونه‌ها پس از چرخه‌های ۶۰ و ۱۲۰ یخبندان کمتر از ۱۰٪ که حد مجاز استاندارد ASTM C 666 می‌باشد، قرار گرفته اند. در گروه $f_c 900$ که مقاومت ۲۸ روزه آن $2/03 \text{ kg/cm}^3$ می‌باشد. با وجود اینکه درصد افت نمونه $f_c 900-60$ برابر $4/3$ و $f_c 900-120$ برابر $9/85$ (در محدوده‌ی مجاز کمتر از ۱۰٪ می‌باشند) است اما به دلیل اینکه مقاومت این دو نمونه کمتر از 2 MPa می‌باشد. طبق استاندارد فوم بتن مورد پذیرش نمی‌باشد. پس از بررسی مقاومت فشاری به سنجش و بررسی درصد افت وزن نمونه‌ها پرداخته شده و مشاهده می‌شود با قرار گرفتن نمونه‌ها در چرخه یخبندان، نمونه‌ها با کاهش وزن روبرو می‌شوند که این درصد افت وزن کمتر از ۵٪ می‌باشد و بنابراین مورد قبول استاندارد ASTM C 666 است. با بررسی نمونه‌ها از لحاظ شکل ظاهری به این نتیجه می‌رسیم که در چگالی‌های ۹۰۰، ۱۰۰۰، ۱۱۰۰ پس از ۱۲۰ چرخه یخبندان سطح نمونه‌ها پوسته شده‌اند و نمونه‌ها قابل قبول نبوده و تخریب شده محسوب می‌شوند. با توجه به مطالب فوق می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از فوم بتن که در معرض مستقیم با عوامل جوی و چرخه‌های یخبندان قرار دارد مانند دیوارهای خارجی و کف‌سازی و شیب‌بندی پشت‌بام‌ها فقط در محدوده‌ی چگالی‌های ۱۱۰۰ تا 1600 Kg/m^3 مجاز می‌باشد و تخریب نمی‌گردند.

مراجع

- [1] Ravindra K. Dhir, Moray D. New lands and Aikaterini MC Carthy; "Use of foamed concrete in construction"; Proceeding of International Conference of Global Construction, (2005).
- [2] Pushkareva E.K.; "Heat-Resistant alkaline binders"; Proceeding of First Int. Conf. on Alkaline Cement., Kiev, pp.(2004). 245-256.
- [۳] بهفرنیا، ک و عباسی، ر؛ «مطالعه پارامترهای مؤثر بر بتن»، چهارمین کنگره ملی مهندسان عمران، دانشگاه تهران، ۱۳۸۷.
- [4] Byun KJ, Song HW, Park SS. "Development of structural lightweight foamed concrete using polymer foam agent". ICPC-98; 1998
- [5] Kearsley EP, Wainwright PJ. "The effect of high fly ash content on the compressive strength of foamed concrete". Cem Concr Res ,2001;31:105-12.
- [6] De Rose L, Morris J. "The influence of mix design on the properties of microcellular concrete". In Dhir RK, Handerson NA. Editors. Specialist techniques and materials for construction. Londen:Thomas Telford; 1999.p. 185-97.
- [7] ASTM. "Specification for Concrete Aggregates", ASTM C33, West Conshohocken, PA,(2003).
- [8] ASTM. "Standard test method for resistance of concrete to rapid freezing and thawing"; ASTM C 666-84, Philadelphia, (1988).
- [9] ASTM, "Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes", ASTM C1585-04, West Conshohocken, PA, (2004).

[۱۰] نویل، آ؛ «تکنولوژی بتن»، علی اکبر رضانیانپور، محمدرضا شاه‌نظری؛ تهران: دانشگاه علم و صنعت، ۱۳۹۰.