

مطالعه‌ی آزمایشگاهی بر روی بتن پاششی مورد استفاده در پانل‌های پیش ساخته‌ی سبک سه بعدی و تعیین خصوصیات آن

مهران زینلیان *

استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان

امید خواجه خباز

دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان

علیرضا خواجه خباز

دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه پیام نور واحد تهران شمال

چکیده

در این تحقیق به مطالعه‌ی آزمایشگاهی بر روی بتن پاششی مورد استفاده در پانل‌های پیش ساخته‌ی سبک سه بعدی پرداخته شده است. هدف از این تحقیق بدست آوردن اطلاعات دقیق در مورد خصوصیات این نوع بتن از جمله مدول الاستیسیته و ضریب پواسن و استفاده از این اطلاعات برای مدلسازی‌های عددی می‌باشد. به همین منظور مطابق با نشریه‌ی ۳۸۵ دستورالعمل طراحی، ساخت و اجرای سامانه‌های پانلی سه بعدی، دو جعبه‌ی فلزی با ابعاد $150 \times 600 \times 600$ میلی‌متر مکعب تهیه و داخل آن بتن پاششی با طرح اختلاط مشخص پاشیده شد. یکی از جعبه‌ها در حالت ایستاده و جهت پاشش بتن به صورت عمود بر آن و مطابق با شرایط واقعی دیوار پانلی و دیگری در حالت افقی، به نحوی که جهت پاشش بتن از بالا و عمود بر آن انجام گرفت. پس از گذشت ۲۸ روز از زمان پاشیدن بتن، نمونه‌های استوانه‌ای با ارتفاع $14/6$ و قطر $7/3$ سانتی‌متر با روش مغزه‌گیری تهیه شد و سپس این مغزه‌ها تحت آزمایش فشاری تک محوره و آزمایش دینامیکی غیر مخرب فراصوتی قرار گرفتند. با توجه به آزمایش انجام شده بر روی مغزه‌ها، نمودار تنش- کرنش، مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته، ضریب پواسن، و دیگر خواص مغزه‌های بتن پاششی بدست آمدند. همچنین مغزه‌های گرفته شده از دو جعبه‌ی مذکور از لحاظ خصوصیات با یکدیگر مقایسه شدند تا تأثیر جهت پاشش بتن و جهت گرفتن مغزه‌ها از نمونه‌ها نیز تعیین گردد.

واژه‌های کلیدی: سیستم پانل پیش ساخته‌ی سبک سه بعدی، بتن پاششی، مدول الاستیسیته، ضریب پواسن، آزمایش دینامیکی غیر مخرب فراصوتی.

* نویسنده مسئول: m.zeynalian@eng.ui.ac.ir

۱- مقدمه

همچنان اطلاعات جامع و کاملی در مورد آن در دسترس نمی‌باشد. بنابراین در این تحقیق سعی شده است تا با انجام آزمایش‌های عملی بر روی مغزه‌های بتن پاششی اطلاعات مفید و قابل استفاده برای مدلسازی‌های المان محدود پانل‌های سه بعدی بدست آید. لازم به ذکر است که این تحقیق بخشی از یک تحقیق جامع تر در خصوص بررسی رفتار لرزه‌ای سیستم پانل پیش ساخته‌ی سبک سه بعدی است.

روش مغزه‌گیری برای بدست آوردن مقاومت فشاری و سایر خواص بتن یکی از بهترین و دقیق‌ترین روش‌های آزمایش می‌باشد. افراد مختلفی در مورد مغزه‌های گرفته شده از بتن پاششی، تحقیقاتی را انجام داده‌اند و نتایجی را در این زمینه بدست آورده‌اند.

۲- مروری بر مطالعات انجام گرفته بر روی بتن پاششی

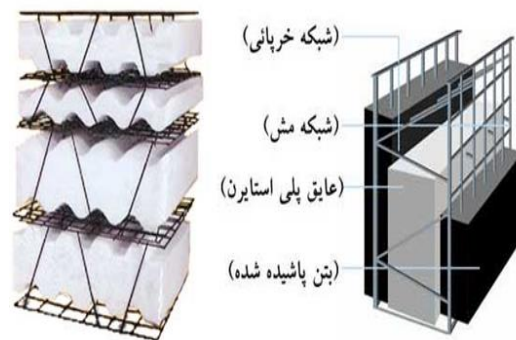
در تحقیقی که کبیر و رهبر [۱] بر روی مغزه‌های بتن پاششی و آزمون‌های استوانه‌ای استاندارد انجام داده‌اند یک رابطه‌ی تجربی بین مقاومت فشاری مغزه‌ها و مقاومت فشاری نمونه‌های استوانه‌ای استاندارد بدست آوردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که با توجه به اینکه عملیات مغزه‌گیری بسیار پرهزینه است، می‌توان با انجام آزمایش بر روی نمونه‌های استوانه‌ای استاندارد و استفاده از رابطه‌ی ۱، مقاومت فشاری مغزه‌ها را بدست آورد. همچنین به این نتیجه رسیدند که نسبت مقاومت مغزه‌های گرفته شده از بتن پاششی به مقاومت آزمون‌های استاندارد بین ۰/۴۸ تا ۰/۵۷ است.

$$f_{co} = -0.011f_{cc}^2 + 6.5f_{cc} - 846.6 \quad (1)$$

که در آن f_{co} مقاومت فشاری مغزه‌ها و f_{cc} مقاومت فشاری نمونه‌های استوانه‌ای استاندارد می‌باشد.

در تحقیق دیگری که توسط کبیر و حجازی [۲] انجام گرفته است، مدول ارتجاعی بتن پاششی به روش آزمایشگاهی بدست آمد و با روابط آیین‌نامه‌ای مقایسه شد و به این نتیجه رسیدند که مقدار مدول ارتجاعی پیش‌بینی شده از رابطه‌ی ارائه شده در آیین‌نامه آبا [۳] حدود ۲۷ درصد بیشتر از مدول ارتجاعی استاتیکی بدست آمده از آزمایش می‌باشد. در تحقیقی که هواچک^۱ و همکاران [۴] بر روی بتن پاششی انجام داده‌اند، به مقایسه‌ی نتایج مقاومت فشاری

یکی از سیستم‌های سازه‌ای که امروزه در صنعت ساختمان سازی کشور ما و سایر کشورهای جهان به نحو فزاینده‌ای رو به رشد است، سیستم پانل پیش ساخته‌ی سبک سه بعدی می‌باشد که هم به عنوان اعضای باربر و هم به عنوان دیوارهای غیرباربر در ساختمان‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. سیستم پانل پیش ساخته‌ی سبک سه بعدی از یک هسته‌ی عایق پلی استایرن منبسط شده با ضخامت ۴۰ تا ۱۰۰ میلی‌متر به همراه دو شبکه‌ی فلزی در طرفین عایق که به وسیله‌ی مفتول‌های فولادی مورب به یکدیگر متصل شده‌اند تشکیل شده است و یک شبکه‌ی فلزی سه بعدی را تشکیل می‌دهد. این قطعات پس از انتقال به محل احداث ساختمان به یکدیگر متصل و از دو طرف به آن‌ها بتن پاشیده می‌شود. از تلفیق پانل و بتن سازه‌ی ساختمان حاصل می‌شود. شکل ۱ نمونه‌ای از پانل‌های سه بعدی را نشان می‌دهد.



شکل ۱- جزئیات پانل پیش ساخته‌ی سبک سه بعدی

با توجه به رشد فزاینده‌ی بکارگیری این روش ساختمانی در صنعت ساختمان کشور، اهتمام به تولید انبوه مسکن و لزوم تدوین ضوابط و مقررات لازم طراحی و اجرایی این فناوری، شناخت بیشتر از رفتار مصالح مورد استفاده در این سیستم امری اجتناب ناپذیر است. همچنین با توجه به تفاوت‌های موجود در بتن پاششی و بتن معمولی از جمله استفاده از ریزدانه‌ها به عنوان سنگدانه و عدم استفاده از درشت دانه‌ها و همچنین ضخامت کم بتن پاششی، این نیاز احساس می‌شود که مطالعه و تحقیق بیشتری بر روی خواص این نوع بتن انجام پذیرد. با وجود اینکه مطالعات تجربی و آزمایشگاهی فراوانی بر روی این نوع بتن صورت گرفته است،

^۱ Hubacek

طوری در نظر گرفته شده است که وابستگی نتایج به ساینز مش بندی در مدل‌های المان محدود را حذف می‌کند. این مدل تغییرات بسیار کوچک مشخصات مصالح بتن پاششی را به خاطر جذب آب توسط سیمان در طی ۲۸ روز پس از پاشش بتن در نظر می‌گیرد. در ایجاد مدل مذکور عوامل تأثیرگذار دیگر نظیر خزش، جمع شدگی و دمای جذب آب توسط سیمان در تغییر شکل‌های اولیه‌ی بتن پاششی لحاظ شده است ولی این مدل اثر تغییرات دما در ضخامت المان‌های بتن پاششی را در نظر نمی‌گیرد که برای رسیدن به آن، آزمایش‌های متعددی بر روی بتن پاششی مورد نیاز است. در تحقیقی که بنچر و جاگرم^۴ [۶] بر روی مغزه‌های بتن پاششی انجام داده‌اند به این نتیجه رسیدند که در صورتی که مغزه‌هایی با سنگدانه‌های با ابعاد حداکثر ۲۰ و با قطر ۱۰۰ میلی‌متر تهیه شود، مقاومت این مغزه‌ها در مقایسه با مغزه با قطر ۵۰ میلی‌متر و با شرایط یکسان حداقل ۱۰ درصد بیشتر است و پترسون^۵ [۷] تعیین کرد که مقاومت فشاری مغزه‌های گرفته شده از بتن پاششی از مقاومت فشاری استوانه‌ای استاندارد با عمر یکسان کمتر می‌باشد و همواره نسبت مقاومت مغزه‌ها به نمونه‌های استوانه‌ای استاندارد کمتر از ۱ است.

۳- هدف تحقیق

از آنجا که دانستن خواص مکانیکی بتن‌های پاششی برای بررسی رفتار لرزه‌ای سیستم پانل پیش ساخته‌ی سبک سه بعدی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و با توجه به اینکه اطلاعات جامع و کاملی در مورد بتن پاششی مورد استفاده در این سیستم و استفاده‌ی آن‌ها در مدلسازی‌های المان محدود در دسترس نبود، در این تحقیق سعی شده است که با انجام آزمایش فشاری تک محوره و آزمایش غیر مخرب دینامیکی با امواج فراصوتی بر روی مغزه‌های بتن پاششی، خصوصیات این مغزه‌های بتنی از جمله مدول ارتجاعی استاتیکی و دینامیکی، ضریب پواسن، مقاومت ظاهری، میزان تخلخل و تأثیر جهت پاشش بتن بر مقاومت فشاری بدست آید تا بتوان از نتایج آن در آنالیزهای عددی مربوط به پانل‌های سه بعدی بهره جست.

بتن پاششی به سه روش مختلف پرداخته‌اند. به همین منظور پس از تهیه‌ی جعبه‌های فلزی با ابعاد ۲۰×۵۰×۵۰ سانتی‌متر مکعب و پاشش بتن با طرح اختلاط معین به داخل آن، نمونه‌های بتن پاششی برای تعیین مقاومت ۳، ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه‌ی آن تهیه شد. بر روی هر یک از مغزه‌های بتن پاششی دو آزمایش غیر مخرب چکش اشمیت^۱ و آزمایش امواج فراصوت^۲ و آزمایش مقاومت فشاری تک محوره انجام گرفت. برای انجام آزمایش چکش اشمیت هر نمونه به ۶ ناحیه تقسیم بندی شد و آزمایش در نقاط معینی از این نواحی انجام گرفت که نتایج مقاومت فشاری بدست آمده از این روش نشان داد که تفاوت مقاومت فشاری نقاط مختلف تنها ۱۵ درصد است. پس از آن آزمایش امواج فراصوت با فرکانس طبیعی ۸۲ Hz بر روی نمونه‌ها و در نقاط متناظر با آزمایش چکش اشمیت بر روی نمونه‌ها انجام گرفت که با در نظر گرفتن زمان عبور امواج صوتی و طول مسیر عبوری آن، سرعت این امواج حاصل شده و با روابط تجربی، مقاومت نقاط مختلف بلوک بدست آمد. پس از آن آزمایش فشاری تک محوره بر روی مغزه‌های گرفته شده به قطر ۱۰۰ میلی‌متر انجام شد و مقاومت فشاری آن‌ها نیز بدست آمد. نتایج این سه روش با یکدیگر مقایسه شد و نشان داد که تفاوت مقاومت فشاری روش چکش اشمیت با روش امواج فراصوت تنها ۴/۴ تا ۵/۵ درصد و با روش مقاومت فشاری تک محوره ۳/۵ تا ۲۰/۷ درصد بوده که بیانگر انطباق خوب نتایج این سه روش آزمایش با یکدیگر است.

اسکوترز^۳ و همکاران [۵] در تحقیقات خود بر روی بتن پاششی، یک مدل تحلیلی برای رفتار آن با استفاده از کالیبره کردن اطلاعات آزمایشگاهی بدست آمده از انجام آزمایش‌های فشاری بر روی مغزه‌های بتن پاششی بدست آوردند. این مدل بر اساس تئوری الاستو-پلاستیک بیان شده است که رفتار وابسته به زمان بتن پاششی را شبیه سازی می‌کند. نوآوری این مدل بیشتر مربوط به لحاظ کردن پارامترهای سخت شونده‌گی و نرم شونده‌گی بتن پاششی است که شبیه سازی واقع‌گرایانه‌ای از رفتار بتن پاششی را ایجاد می‌کند. همچنین در این مدل اثر ترک‌های بتن پاششی

^۵ A. Bentur and Jagermann

^۶ N. Petersons

^۲ Schmidt Rebound Hammer

^۳ Ultrasonic Pulse Method

^۴ Schutz

۴- معرفی مصالح مصرفی و طرح اختلاط بتن پاششی

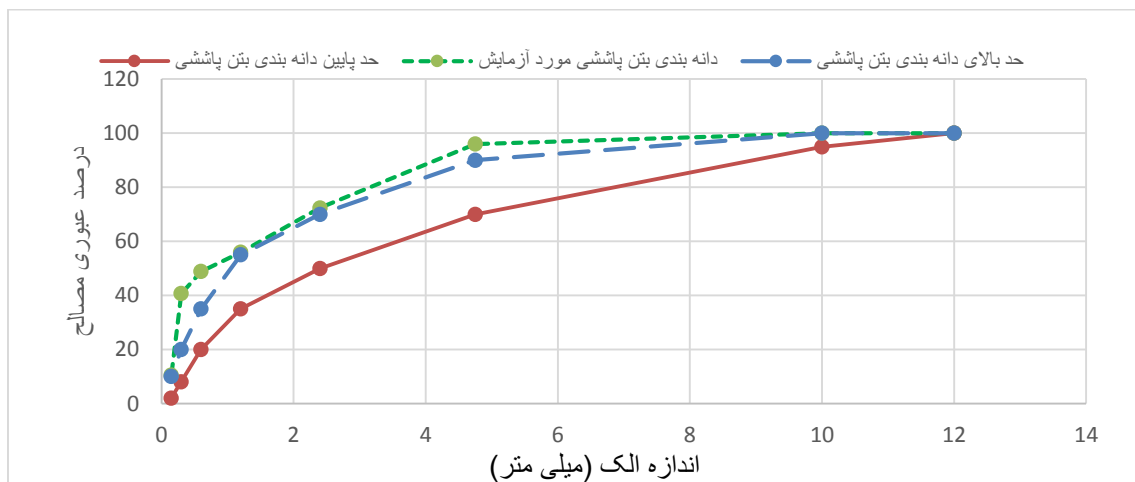
همانطور که قبلاً ذکر شد، بتن پاششی فاقد مصالح درشتدانه است و سنگدانه‌های مصرفی در این نوع بتن مصالح ریزدانه‌ی شن و ماسه است. شن و ماسه مورد استفاده برای تهیه‌ی بتن پاششی از معدن شن مبارکه اصفهان و آب مورد استفاده در طرح اختلاط، آب شرب اصفهان و سیمان مصرفی از کارخانه‌ی سیمان سپاهان اصفهان و از نوع سیمان معمولی تهیه شد. لازم به ذکر است در این تحقیق تلاش گردید تا بر اساس یک نمونه‌ی موردی و واقعی از سیستم پانل پیش ساخته‌ی سبک سه بعدی، مطالعات لازم صورت پذیرد. بر همین اساس، نسبت اختلاط مصالح تشکیل دهنده‌ی بتن پاششی بر اساس تجارب کارگاهی یکی از کارگاه‌های فعال و مجاز در این زمینه که در زمان انجام تحقیق در حال اجرای این سازه‌ها به صورت انبوه می‌باشد، تعیین شد. طرح اختلاط مصالح مصرفی در بتن پاششی باید به گونه‌ای باشد که دارای کارایی مناسب جهت پمپ پذیری مناسب بتن بوده و از بازگشت آن در حین پاشیدن آن جلوگیری کند. به همین منظور از مصالح مورد استفاده در تهیه بتن پاششی با استفاده از الگ‌های استاندارد و مطابق با بند ۶-۴-۳ نشریه‌ی ۳۸۵ دستورالعمل طراحی، ساخت و اجرای سامانه‌های پانلی سه بعدی [۸]، آزمایش دانه‌بندی به عمل آمد و نمودار دانه‌بندی مصالح مربوطه مطابق با

جدول ۱- طرح اختلاط بتن پاششی

نسبت‌های اختلاط	سیمان	سنگدانه	آب	وزن مخصوص بتن پاششی ($\frac{Kg}{m^3}$)
وزن واحد	۴۶۰	۱۴۶۰	۲۴۰	۲۱۶۰
حجم ($\frac{Kg}{m^3}$)				

مطابق با بند ۶-۱۰-۴ نشریه‌ی ۳۸۵، حدود متداول نسبت وزنی آب به سیمان مخلوط بتن پاشیده ۰/۳۵ تا ۰/۵ و نسبت متداول سنگدانه به سیمان ۳/۵ تا ۴/۵ می‌باشد که در نمونه‌ی بتن پاششی تهیه شده این دو نسبت به ترتیب ۰/۵۲ و ۳/۲ است.

همانطور که قبلاً ذکر شد، بتن پاششی فاقد مصالح درشتدانه است و سنگدانه‌های مصرفی در این نوع بتن مصالح ریزدانه‌ی شن و ماسه است. شن و ماسه مورد استفاده برای تهیه‌ی بتن پاششی از معدن شن مبارکه اصفهان و آب مورد استفاده در طرح اختلاط، آب شرب اصفهان و سیمان مصرفی از کارخانه‌ی سیمان سپاهان اصفهان و از نوع سیمان معمولی تهیه شد. لازم به ذکر است در این تحقیق تلاش گردید تا بر اساس یک نمونه‌ی موردی و واقعی از سیستم پانل پیش ساخته‌ی سبک سه بعدی، مطالعات لازم صورت پذیرد. بر همین اساس، نسبت اختلاط مصالح تشکیل دهنده‌ی بتن پاششی بر اساس تجارب کارگاهی یکی از کارگاه‌های فعال و مجاز در این زمینه که در زمان انجام تحقیق در حال اجرای این سازه‌ها به صورت انبوه می‌باشد، تعیین شد. طرح اختلاط مصالح مصرفی در بتن پاششی باید به گونه‌ای باشد که دارای کارایی مناسب جهت پمپ پذیری مناسب بتن بوده و از بازگشت آن در حین پاشیدن آن جلوگیری کند. به همین منظور از مصالح مورد استفاده در تهیه بتن پاششی با استفاده از الگ‌های استاندارد و مطابق با بند ۶-۴-۳ نشریه‌ی ۳۸۵ دستورالعمل طراحی، ساخت و اجرای سامانه‌های پانلی سه بعدی [۸]، آزمایش دانه‌بندی به عمل آمد و نمودار دانه‌بندی مصالح مربوطه مطابق با



شکل ۲- نمودار دانه‌بندی مصالح بتن پاششی مورد آزمایش

۵- برنامه‌ی آزمایش

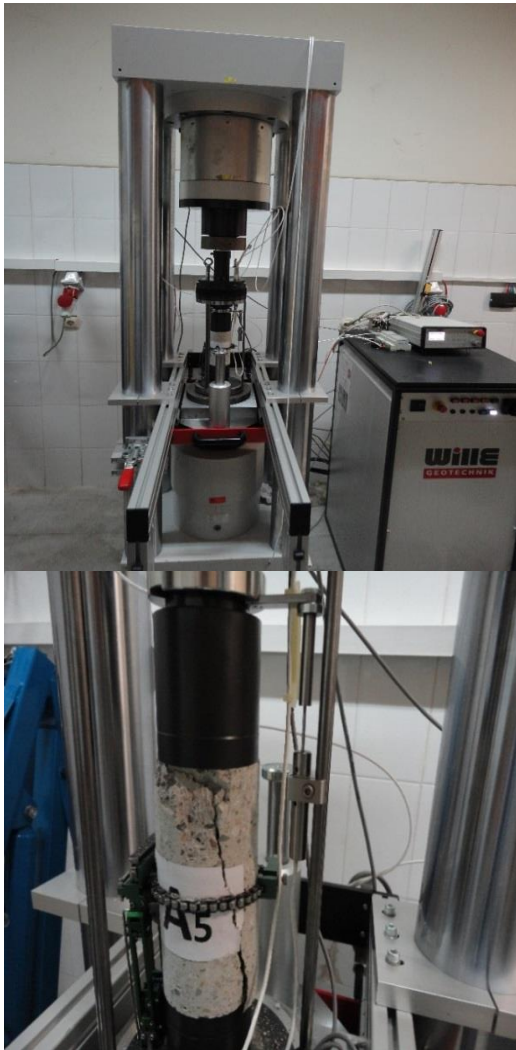
قطر ۱۵ سانتی‌متر و یک جعبه‌ی فلزی با ابعاد ۶۰۰×۶۰۰×۱۵۰ میلی‌متر مکعب تهیه شد و بتن پاششی مورد استفاده در پروژه‌ی مذکور در قالب‌ها پاشیده شد. با توجه به تأکید نشریه‌ی ۳۸۵ مبنی بر آنکه در حین عملیات بتن پاشی برای مغزه‌گیری، نحوه‌ی قرارگیری جعبه (افقی، قائم یا شیب‌دار) باید مطابق با شرایط

برای انجام آزمایش بر روی بتن پاششی، به محل احداث یک ساختمان بتنی ترکیب شده با سیستم پانلی سه بعدی پیش ساخته در شهرک شهید کشوری اصفهان مراجعه شد. به همین منظور مطابق با نشریه‌ی ۳۸۵، تعداد ۱۰ قالب استوانه‌ای استاندارد با ارتفاع ۳۰ و

شدن انحنای منحنی تنش- کرنش بتن می شود ولی با افزایش مدت زمان بارگذاری، تغییر شکل مذکور افزایش می یابد.

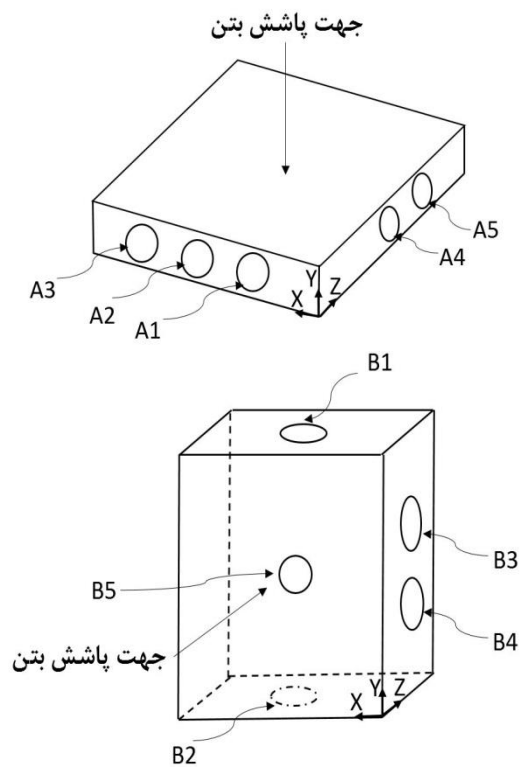
۲-۶- ارائه‌ی منحنی‌های تنش- کرنش مغزه‌های بتن پاششی

پس از تهیه‌ی مغزه‌های بتن پاششی، برای ترسیم منحنی تنش- کرنش و تعیین مقاومت فشاری و سایر خصوصیات این نوع بتن، مغزه‌های تهیه شده تحت آزمایش فشاری تک محوره مطابق شکل ۷ قرار گرفتند. منحنی‌های تنش- کرنش حاصل از آزمایش تک محوره‌ی مغزه‌های بتن پاششی در شکل ۸ نشان داده شده است. برای مدلسازی المان محدود دیوارهای پانلی در نرم افزار از منحنی تنش- کرنش میانگین مطابق شکل ۸ استفاده شده است.



شکل ۷- آزمایش مقاومت فشاری تک محوره بر روی مغزه‌های بتن پاششی

A_1, A_2 و A_3 : از نمونه‌ی افقی در صفحه‌ی $X-Y$
 A_4 و A_5 : از نمونه‌ی افقی در صفحه‌ی $Y-Z$
 B_1 : از بالای نمونه‌ی ایستاده در صفحه‌ی $X-Z$
 B_2 : از پایین نمونه‌ی ایستاده در صفحه‌ی $X-Z$
 B_3 و B_4 : از نمونه‌ی ایستاده در صفحه $Y-Z$
 B_5 : از نمونه‌ی ایستاده در صفحه $X-Y$

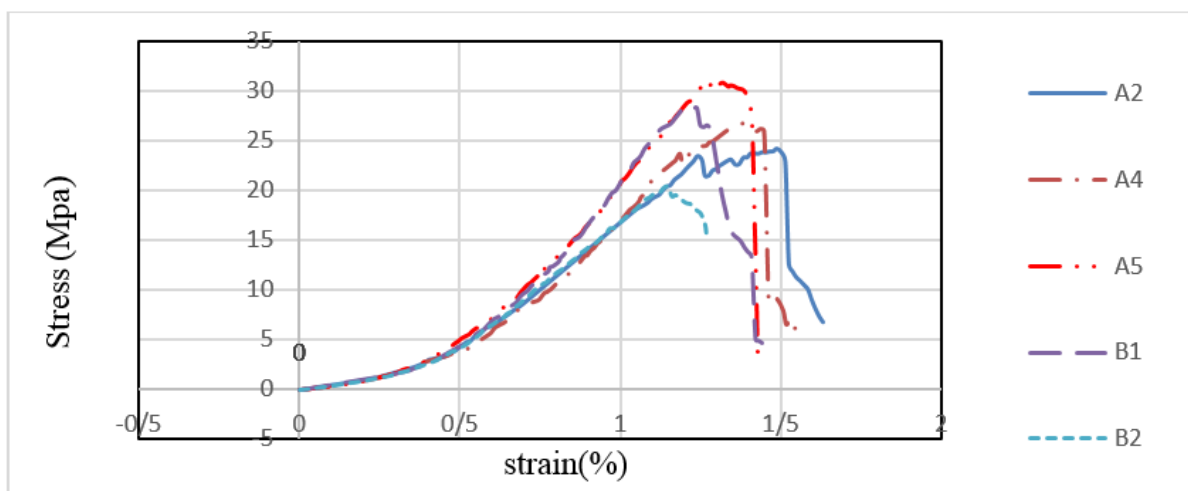


شکل ۶- نقاط مغزه گیری از نمونه‌های بتن پاششی

۶- منحنی تنش- کرنش مغزه‌های بتن پاششی و تعیین خصوصیات آن‌ها

۱-۶- معرفی منحنی تنش- کرنش بتن

منحنی تنش- کرنش اجزای اصلی بتن یعنی مصالح سنگی و خمیر سیمان به صورت خطی در نظر گرفته شده است [۲]؛ ولی منحنی تنش- کرنش بتن عموماً به صورت غیرخطی است که علت آن را می توان وجود ترک‌های ریز در سطح مشترک خمیر و سنگدانه و گسترش این ترک‌ها عنوان کرد [۲]. نحوه‌ی اعمال تنش بر روی نمونه‌های بتنی و سرعت بارگذاری بر روی شکل منحنی تنش- کرنش تأثیر گذار است به طوری که اگر بارگذاری با سرعت خیلی زیاد اعمال شود سبب کاهش تغییر شکل نسبی و به تبع آن کم



شکل ۸- منحنی‌های تنش - کرنش مغزه‌های بتن پاششی

۷- تعیین مشخصات مکانیکی بتن پاششی

۷-۱- مدول ارتجاعی استاتیکی

شیب منحنی تنش- کرنش بتن به عنوان مدول ارتجاعی بتن محسوب می‌شود. مدول ارتجاعی بتن بسته به نوع بتن، سن بتن، نوع و سرعت بارگذاری، خصوصیات اجزای بتن و درصد اختلاط و از همه مهم‌تر نحوه‌ی تعیین مدول ارتجاعی متفاوت خواهد بود [۹]. تعیین مدول ارتجاعی مغزه‌های بتن پاششی، با توجه به شکل منحنی تنش- کرنش آن به سه روش مدول ارتجاعی سکانتی یا وتری، مدول ارتجاعی تانژانسی یا مماسی و مدول ارتجاعی میانگین انجام می‌گیرد. مدول ارتجاعی سکانتی معمولاً شیب خطی است که نقطه‌ی تنش صفر را به نقطه‌ی نظیر تنش فشاری خاصی ترسیم می‌کند [۹]. بنابراین تنشی که در آن مدول ارتجاعی تعیین می‌شود با اهمیت بوده و باید تعیین شود. معمولاً این تنش بر حسب درصدی از تنش نهایی بتن است که آیین‌نامه‌های مختلف درصد‌های متفاوتی را بیان می‌کنند. مدول ارتجاعی مماسی معمولاً شیب خطی است که در درصدی از تنش نهایی بتن ترسیم می‌شود که آیین‌نامه‌های مختلف نیز درصد‌های متفاوتی را بیان می‌کنند و مدول ارتجاعی میانگین از میانگین شیب قسمت‌های خطی نمودار تنش- کرنش محاسبه می‌شود. نظر به اینکه در تحقیقات گذشته [۲۰] از روش آیین‌نامه‌ی ASTM C469 [۱۰] برای تعیین مدول ارتجاعی مغزه‌های بتن پاششی استفاده شده است، در این تحقیق نیز از روش همین آیین‌نامه برای تعیین مدول ارتجاعی

مغزه‌های بتن پاششی استفاده شده است که در آن مقدار تنش مورد نظر برای تعیین مدول ارتجاعی به روش وتری، ۴۰ درصد تنش نهایی است.

۷-۲- ضریب پواسن بتن

وقتی یک نمونه‌ی استوانه‌ای بتنی تحت فشار تک محوره قرار می‌گیرد، هم زمان با کوتاه شدن طول نمونه و ایجاد کرنش‌های فشاری محوری، نمونه در جهت جانبی افزایش بُعد پیدا می‌کند. نسبت کرنش جانبی به کرنش فشاری محوری به عنوان ضریب پواسن در نظر گرفته می‌شود. در این آزمایش مطابق با شکل ۷ از یک کرنش سنج جانبی که دقیقاً در وسط ارتفاع مغزه‌ها تعبیه شده است برای تغییرات شعاع و از یک کرنش سنج محوری برای تعیین تغییرات طول مغزه تحت فشار استفاده شده است. لازم به ذکر است که به دلیل حساس و پرهزینه بودن کرنش سنج جانبی و احتمال آسیب دیدن آن در لحظه‌ی شکستن مغزه، فقط برای تعدادی از مغزه‌ها ضریب پواسن محاسبه شده است. لازم به ذکر است مقدار ضریب پواسن مورد انتظار برای بتن با مقاومت بالا در حدود ۰/۱۱ و برای بتن با مقاومت پایین در حدود ۰/۲۱ می‌باشد [۹]. نتایج حاصل از آزمایش فشاری تک محوره بر روی مغزه‌ها در جدول ۲ ارائه شده است. با توجه به نتایج بدست آمده، مقدار مقاومت فشاری منحنی تنش- کرنش میانگین مغزه‌های بتن پاششی ۲۵/۶ Mpa، مقدار مدول الاستیسیته ۱/۴ Gpa و ضریب پواسن ۰/۱۷ می‌باشد.

جدول ۲- نتایج آزمایش فشاری تک محوره بر روی مغزه‌ها

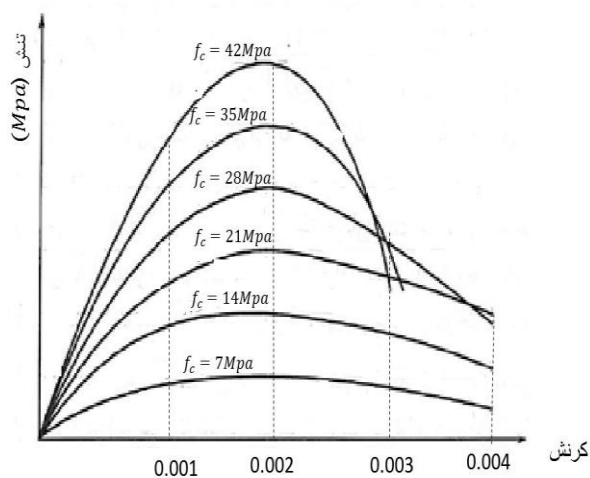
نام نمونه	ارتفاع میانگین مغزه H (cm)	قطر میانگین مغزه (cm)	وزن مخصوص ($\frac{Kg}{m^3}$)	مقاومت فشاری (Mpa)	مدول ارتجاعی (Gpa)	ضریب پواسن
A ₂	۱۴/۰۳	۷/۲۸	۲۱۰۵	۲۳/۴۹	۱/۳۲	---
A ₄	۱۴/۵۲	۷/۲۶	۲۱۵۷	۲۶/۸۴	۱/۳۳	۰/۱۶۴
A ₅	۱۴/۷۱	۷/۲۳	۲۱۷۲	۳۱/۰۷	۱/۹۱	۰/۱۷۳
B ₁	۱۴/۵۵	۷/۲۳	۲۲۰۰	۲۸/۴۸	۱/۵۲	---
B ₂	۱۴/۵۱	۷/۲	۲۱۷۸	۲۰/۴۲	۱/۲۱	۰/۱۷۹
B ₃	۱۴/۵۱	۷/۲۳	۲۱۵۶	۲۳/۰۵	۱/۴۶	---
B ₄	۱۴/۴۵	۷/۲۳	۲۱۴۷	۲۱/۵۷	۱/۲۱	۰/۱۷۴
B ₅	۱۴/۴۳	۷/۲۲	۲۱۹۲	۲۹/۹۲	۱/۵۲	---
میانگین	۱۴/۴۶۳	۷/۲۳۵	۲۱۶۳/۳۷	۲۵/۶	۱/۴۳۳	۰/۱۷۲
انحراف معیار	۰/۱۹۴	۰/۲۴۴	۲۹/۸	۴	۰/۲۲۹	۰/۰۰۶۲

حفرات در هم فشرده شده و سنگدانه‌ها در هم قفل می‌شوند و به تدریج با افزایش میزان بار، سختی نمونه زیاد شده و شیب منحنی تنش- کرنش به صورت افزایشی در می‌آید؛ ولی در نمونه‌های بتن معمولی به دلیل اینکه میزان حفرات ایجاد شده بسیار کمتر از بتن پاششی است از همان ابتدای بارگذاری، با افزایش میزان بار، سختی نمونه افزایش یافته و شیب منحنی روند افزایشی خود را تا لحظه‌ی شکست حفظ می‌کند. لازم به ذکر است با مقایسه‌ی منحنی‌های بدست آمده با نتایج برخی دیگر از محققان از جمله [۱۱]، از صحت منحنی‌های تنش- کرنش بتن پاششی اطمینان نسبی حاصل می‌گردد.

مطابق با بند ۶-۱۱-۲-۳-۲ نشریه‌ی ۳۸۵، مقاومت فشاری حجمی از بتن پاشیده شده در صورتی قابل قبول تلقی می‌شود که میانگین مقاومت فشاری سه مغزه‌ی گرفته شده از جعبه‌ی آزمایشی مربوط به آن حجم بتن و همچنین حداقل مقاومت آن‌ها به ترتیب از ۹۰ درصد و ۸۰ درصد مقاومت فشاری مشخصه‌ی بتن پاشیده طرح کمتر نباشد که نتایج جدول ۲ الزامات این بند نشریه را برآورده می‌کند. همچنین مقاومت فشاری مشخصه‌ی بتن پاشیده شده باید منطبق بر مقاومت بتن رده‌ی C16 یا بیشتر باشد که مقاومت فشاری تمام مغزه‌ها از این مقدار بیشتر است.

۳-۷- مقایسه‌ی منحنی‌های تنش- کرنش و سایر خصوصیات بتن معمولی و بتن پاششی

شکل ۹ منحنی تنش- کرنش بتن معمولی با مقاومت‌های متفاوت را نشان می‌دهد. با مقایسه‌ی منحنی‌های تنش- کرنش بتن معمولی با منحنی‌های تنش- کرنش مغزه‌های بتن پاششی مطابق شکل ۸، مشاهده می‌شود که از لحاظ ظاهری این نمودارها تفاوت قابل توجهی با یکدیگر دارند. شیب منحنی تنش- کرنش بتن معمولی در ابتدا عموماً به صورت کاهشی است ولی در مورد مغزه‌های بتن پاششی این شیب به صورت افزایشی می‌باشد. دلیل این امر را می‌توان این‌گونه توجیه کرد که در بتن پاششی به دلیل وجود حفرات زیاد در مغزه‌ها، در مراحل ابتدایی بارگذاری شیب منحنی تنش- کرنش به صورت کاهشی است ولی با افزایش بار، این



شکل ۹: منحنی تنش- کرنش بتن معمولی با مقاومت‌های فشاری متفاوت [۹]

۸- آزمایش دینامیکی غیر مخرب فراصوتی بر روی مغزه‌های بتن پاششی

مدول ارتجاعی عموماً از منحنی تنش- کرنش بدست می‌آید. با این وجود، روش دیگری که برای بدست آوردن مدول ارتجاعی به کار می‌رود و به مدول ارتجاعی دینامیکی موسوم است، استفاده از روش غیر مخرب امواج فرا صوتی^۱ است. مدول ارتجاعی دینامیکی بتن به یک کرنش بسیار کوچک آبی مرتبط بوده و به صورت تقریبی با استفاده از مدول ارتجاعی استاتیکی مماسی اولیه تعیین می‌شود. برای آنالیز تنش در سازه‌هایی که تحت تأثیر بارگذاری زلزله و یا بار ضربه‌ای قرار می‌گیرند، بهتر است از مدول ارتجاعی دینامیکی استفاده شود که می‌توان آن را به صورت دقیق با یک آزمایش صوتی تعیین نمود [۹]. در این روش به کمک امواج طولی و سرعت صوت عبوری از داخل نمونه‌ها و به کمک روابط تجربی در آیین‌نامه‌های مختلف می‌توان مدول ارتجاعی و سایر خصوصیات مغزه‌های بتن پاششی را بدست آورد. در آزمایش دینامیکی فراصوتی به علت عدم وجود بارگذاری بر روی نمونه، ترک و خزش اثری ندارد و تنها اثرات الاستیک تأثیرگذار است؛ و انتظار می‌رود که مدول ارتجاعی بدست آمده از روش دینامیکی به مراتب از روش حاصل از منحنی تنش- کرنش بیشتر باشد [۹]. دستگاهی که با آن آزمایش فرا صوت انجام می‌شود دارای دو فک است که مطابق شکل ۱۰، نمونه‌ی مغزه‌ی بتن پاششی بین این دو فک قرار می‌گیرد که یکی از این دو فک امواج طولی را منتشر می‌کند و پس از گذشت این امواج از نمونه، توسط فک دیگر دریافت می‌شود. پس از آن با توجه به سرعت امواج عبوری از داخل نمونه، خصوصیات مغزه‌ها از جمله مدول الاستیسیته، مدول برشی و دیگر خصوصیات آن‌ها به کمک نرم افزار کامپیوتری مربوط به دستگاه آزمایش فراصوتی بدست می‌آید. نتایج بدست آمده از آزمایش غیر مخرب فراصوتی در جدول ۳ ارائه شده است. لازم به ذکر است که برای تمام مغزه‌ها، امواج بهینه با توجه به ابعاد مغزه‌ها و با روش استاندارد [AST C597] [۱۳]، با فرکانس KHz ۸۰ و از نوع تک پالس به نمونه‌ها فرستاده شده است. مقادیر بدست آمده در جدول ۳ بر اساس سرعت موج عبوری در مغزه‌ها بدست آمده است و روابط مورد استفاده برای محاسبه‌ی مقادیر این جدول

خاطر نشان می‌سازد کرنش نظیر تنش حداکثر (f_c') که با ϵ_0 نمایش داده می‌شود، برای بتن‌هایی با مقاومت پایین تا بتن‌هایی با مقاومت بالا در محدوده‌ی ۰/۰۰۱۵ تا ۰/۰۰۳ متغیر است که معمولاً برای بتن با مقاومت معمولی ۰/۰۰۲ در نظر گرفته می‌شود [۹]. همچنین کرنش نهایی نظیر شکست فشاری بتن که با ϵ_{cu} نمایش داده می‌شود برای انواع بتن معمولی از ۰/۰۰۳ تا ۰/۰۰۵ است [۹]. شکل ۸ که مربوط به منحنی تنش- کرنش مغزه‌های بتن پاششی مورد آزمایش است، نشان می‌دهد که کرنش متناظر با حداکثر مقاومت فشاری (ϵ_0) در بتن پاششی بسیار بیشتر از بتن‌های معمولی و در محدوده‌ی ۰/۰۱۱ تا ۰/۰۱۴ بوده و همچنین کرنش نهایی نظیر شکست فشاری این نوع بتن تا ۰/۰۱۶ می‌تواند ادامه داشته باشد. از آنجا که درشتدانه‌ها در نمونه‌های بتنی تحت آزمایش فشاری تک محوری نقش اساسی را در کاهش کرنش‌های محوری بر عهده دارند بنابراین با توجه به عدم استفاده از درشتدانه‌ها در بتن پاششی، انتظار می‌رود که کرنش متناظر با حداکثر مقاومت فشاری و کرنش نهایی نظیر شکست فشاری این نوع بتن از بتن معمولی بیشتر باشد. آیین‌نامه‌ی بتن آمریکا [۱۲] مقدار مدول الاستیسیته‌ی بتن معمولی با وزن مخصوص $\frac{Kg}{m^3}$ ۲۴۰۰ را بر حسب مگاپاسگال مطابق رابطه‌ی ۲ پیشنهاد داده است. با توجه به مقادیر بدست آمده برای مدول ارتجاعی بتن پاششی در جدول ۲ می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از این رابطه برای محاسبه‌ی مدول ارتجاعی بتن پاششی بیش از ۹۰ درصد خطا دارد. لذا با توجه به بند ۸-۷-۲ نشریه‌ی ۳۸۵ که مدول ارتجاعی بتن پاششی را در حدود ۴۰ تا ۵۰ درصد مدول ارتجاعی بتن معمولی در فرآیند طراحی سامانه‌های پانلی و در نبود اطلاعات جامع برای تعیین مدول ارتجاعی بتن پاشیده در نظر می‌گیرد، پیشنهاد می‌شود که با توجه به نوع بتن، ضریب کاهش ۱۰ تا ۴۰ درصد نسبت به مدول ارتجاعی بتن معمولی برای تخمین مدول ارتجاعی بتن پاششی لحاظ شود. بنابراین، با در نظر گرفتن موارد ذکر شده، مدل کردن بتن پاششی با خصوصیات بتن معمولی در نرم افزار به منظور مدل‌سازی دیوارهای پانلی صحیح نیست و برای آن باید خصوصیات منحصر بفرد بتن پاششی به نرم افزار معرفی شود.

$$E_c = 4700 \sqrt{f_c'} \quad (2)$$

^۱ Ultrasonic Waves

بر اساس روابط تجربی بدست آمده توسط کاستاگنا و همکاران^۱ [۱۴] مطابق روابط ۳ تا ۶ است.

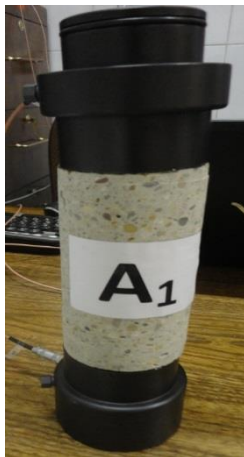


$$V_p = \frac{\left(\frac{H}{10}\right)}{\mu_s \times 10^{-5}} \quad (3)$$

$$G_{dyn} = \frac{E_{dyn}}{2(1+\nu)} \quad (4)$$

$$E_{dyn} = V_p^2 \times \rho \times \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} \quad (5)$$

$$\nu = \frac{\left(\frac{V_p^2}{V_s^2}\right) - 2}{2\left(\frac{V_p^2}{V_s^2}\right) - 1} \quad (6)$$



در روابط بالا، V_p سرعت امواج طولی، ρ دانسیته‌ی مغزه‌های بتن پاششی و μ_s مدت زمان عبور موج طولی است. E_{dyn} ، مدول ارتجاعی دینامیکی است که این مدول از طریق سرعت موج بدست می‌آید ولی مدول ارتجاعی استاتیکی از طریق آزمایش مخرب و در نتیجه‌ی بارگذاری بر روی نمونه بدست می‌آید. همچنین منظور از مقاومت ظاهری، مقاومت نمونه در برابر موج است که به دانسیته و سرعت موج وابسته است و از رابطه‌ی ۷ بدست می‌آید.

$$\text{مقاومت ظاهری} = V_p \times \rho \quad (7)$$

شکل ۱۰- آزمایش فراصوتی بر روی مغزه‌های بتن پاششی

جدول ۳- نتایج حاصل از آزمایش فراصوتی بر روی مغزه‌های بتن پاششی

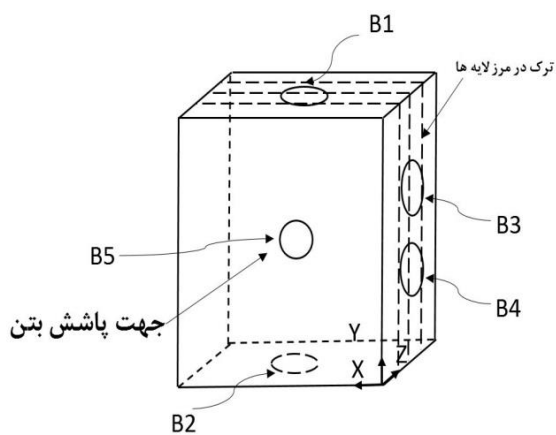
مدت زمان عبور موج طولی (μs)	مدول برشی دینامیکی G (Gpa)	مدول ارتجاعی دینامیکی E (Gpa)	مقاومت ظاهری $\left(\frac{Kg}{m^2s}\right) \times 10^6$	سرعت موج طولی $\left(\frac{km}{sec}\right)$	نمونه
۱۱۰/۶۱	۴/۶۹	۱۱/۲۶	۵/۳	۲/۳۵۸	A ₁
۱۲۵/۱۵	۳/۴۶	۸/۳	۴/۶	۲/۰۳۵	A ₂
۱۲۸/۹۲	۳/۵	۸/۴	۴/۶	۲/۳۶	A ₃
۷۷/۶۴	۱۱/۰۱	۲۶/۴۲	۸/۱	۳/۶۱۲	A ₄
۷۷	۱۱/۵۳	۲۷/۶۶	۸/۳	۳/۳۹۶	A ₅
۸۲/۲۲	۹/۶۶	۲۳/۱۹	۷/۶	۳/۳۸۶	B ₁
۱۱۸/۶۱	۴/۱۴	۱۰	۵	۲/۲۲۲	B ₂
۷۲/۰۸	۱۳/۱۲	۳۱/۴۸	۸/۹	۳/۹۴۳	B ₃
۹۹/۸۴	۶/۰۹	۱۴/۶۱	۶	۲/۶۸۶	B ₄
۹۱/۲	۷/۴۷	۱۷/۹۳	۶/۷	۲/۹۷۵	B ₅
۹۸/۱۲۷	۷/۴۶۶	۱۷/۹۲۵	۶/۵۱	۲/۸۹۷	میانگین
۲۱/۳۴۸	۳/۶۲۴	۸/۶۹	۱/۶۳۱	۰/۶۶۰	انحراف معیار

^۱ Castagna

مغزه‌ی B2 و مقاومت مغزه‌ی B3 از B4 بیشتر است و با نتایج آزمایش دینامیکی غیر مخرب مطابقت دارد. همچنین با توجه به این موضوع که سرعت موج از داخل جسم جامد بیشتر از سرعت آن در هوا است، با مقایسه‌ی سرعت موج عبوری از داخل مغزه‌ی B1 و B2 و همچنین مغزه‌ی B3 و B4 با یکدیگر می‌توان به این نتیجه رسید که میزان تخلخل در بالای نمونه‌ی ایستاده کمتر از پایین آن است که می‌تواند دلیلی بر بالاتر بودن مقاومت مغزه‌های گرفته شده از این ناحیه نسبت به پایین نمونه‌ی ایستاده نیز باشد.

۴- با توجه به مقادیر بدست آمده در جدول ۲، برای مقاومت فشاری مغزه‌های گرفته شده از نمونه‌ی ایستاده و مقایسه‌ی این مقادیر با مغزه‌های نمونه‌ی افقی، می‌توان نتیجه گرفت که مغزه‌های نمونه‌ی ایستاده دارای مقاومت کمتری نسبت به مغزه‌های نمونه‌ی افقی هستند. با توجه به اینکه به جعبه‌ی ایستاده در چند مرحله بتن پاشیده شده است و بین هر لایه تعدادی ترک ایجاد شده است، می‌توان نتیجه گرفت که در نمونه‌ی ایستاده ترک‌های بیشتری ایجاد شده است و مقاومت فشاری آن‌ها از نمونه‌ی افقی کمتر است.

۵- با توجه به اینکه در نمونه‌ی ایستاده عملیات پاشش بتن در چند مرحله انجام شده است، بنابراین مطابق شکل ۱۱، در مرز هر لایه تعدادی ترک ایجاد می‌شود. با در نظر گرفتن جهت مغزه‌گیری، نحوه‌ی ایجاد ترک در مغزه‌های B1 تا B5 را می‌توان مطابق شکل ۱۲ استنباط کرد.



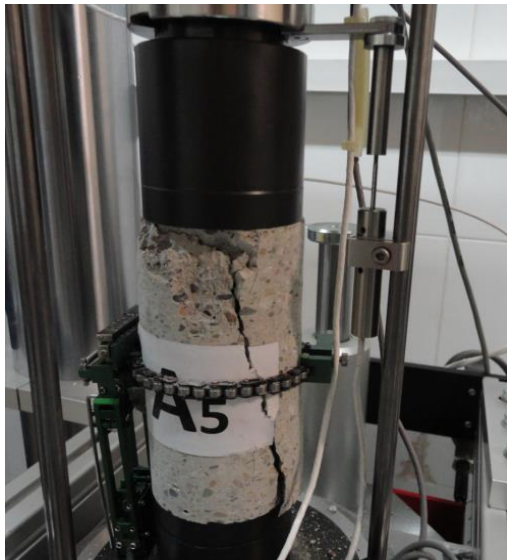
شکل ۱۱- ترک‌های ایجاد شده در مرز لایه‌ها در نمونه‌ی ایستاده

با توجه به اطلاعات بدست آمده از آزمایش غیر مخرب فراصوتی و آزمایش فشاری تک محوری مغزه‌های بتن پاششی می‌توان نتایج زیر را استخراج کرد.

۱- برای سه مغزه‌ی A1، A2 و A3 که از یک جهت از نمونه‌ی افقی مغزه‌گیری شده‌اند و همچنین نمونه‌های A4 و A5، مقاومت ظاهری، مدول ارتجاعی و مدول برشی این نمونه‌ها با یکدیگر تقریباً یکسان بدست آمده است و نشان می‌دهد که مغزه‌های گرفته شده از نمونه‌ی افقی به صورت تقریباً همگن بوده و توزیع مصالح در آن‌ها به صورت یکنواخت است.

۲- مقادیر مقاومت ظاهری، مدول ارتجاعی و مدول برشی مغزه‌های A2، A4 و A5 در آزمایش دینامیکی غیر مخرب نشان می‌دهد که مقاومت مغزه‌ی A5 از مغزه‌ی A4 و مغزه‌ی A4 از مغزه‌ی A2 بیشتر است که نتایج مقاومت فشاری این مغزه‌ها از آزمایش استاتیکی مطابق جدول ۲ نیز گواه این مطلب است.

۳- با توجه به مغزه‌ی B1 که از بالای نمونه‌ی ایستاده از صفحه‌ی X-Z و مغزه‌ی B2 که از پایین این نمونه و در همان صفحه گرفته شده است، مشاهده می‌شود که مقاومت ظاهری، مدول ارتجاعی و مدول برشی این دو مغزه از آزمایش دینامیکی فراصوتی با هم تفاوت دارند که نشان می‌دهد مغزه‌ی B1 دارای مقاومت بیشتری نسبت به مغزه‌ی B2 است. دلیل این مورد را می‌توان این گونه توجیه کرد که در جعبه‌ی ایستاده پس از پاشش بتن بسیاری از مصالح به پایین جعبه ریزش می‌کند و باعث ایجاد تخلخل زیادی در این ناحیه از جعبه می‌شود، این در حالی است که مقدار بتن پاشیده شده به بالای جعبه بدون ریزش به همان قسمت می‌چسبد و تخلخل کمتری در این ناحیه ایجاد می‌شود. در مورد مغزه‌های B3 و B4 که این دو مغزه نیز از نمونه‌ی ایستاده و به ترتیب از بالا و پایین آن در صفحه‌ی Y-Z گرفته شده‌اند، چنین نتیجه‌ای را می‌توان گرفت. این مطلب نشان می‌دهد که توزیع مصالح در نمونه‌ی ایستاده در مقایسه با نمونه‌ی افقی یکنواخت نیست. نتایج مقاومت فشاری مغزه‌ها در جدول ۲ دلیلی بر صحت این موضوع است که مقاومت مغزه‌ی B1 از

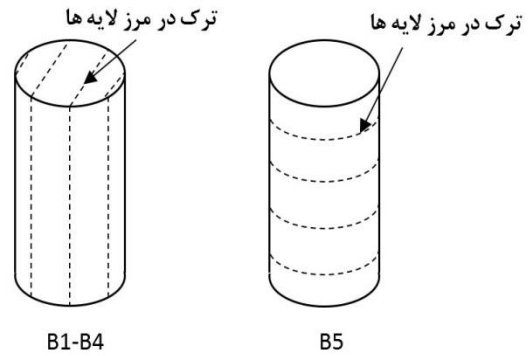


شکل ۱۴- نحوه‌ی شکست مغزه‌ی A5

۶- با در نظر گرفتن جهت مغزه‌گیری مغزه‌های B1 تا B4، نحوه‌ی ایجاد ترک در این نمونه‌ها را می‌توان به صورت شکل ۱۲ در نظر گرفت. به دلیل اینکه ترک‌های ایجاد شده به موازات راستای اعمال بار هستند بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که این مغزه‌ها دارای مقاومت فشاری کمتری نسبت به مغزه‌ی B5 بوده که نتایج آزمایش فشاری تک محوره بر روی این مغزه‌ها نتیجه‌ی یکسانی را نشان می‌دهد.

با توجه به نتایج آزمایش مقاومت فشاری و آزمایش غیر مخرب فرا صوتی برای نمونه‌ی ایستاده می‌توان این نتیجه‌ی کلی را گرفت که مغزه‌های گرفته شده در جهت پاشش بتن دارای بیشترین مقاومت فشاری هستند و مغزه‌های گرفته شده از بالای نمونه‌ی ایستاده دارای مقاومت بیشتری نسبت به مغزه‌های پایین نمونه بوده که دلایل آن در بالا بیان شد.

با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان گفت که نحوه‌ی پاشش بتن به قالب مکعبی می‌تواند بر مقاومت فشاری و سایر مشخصات مغزه‌های گرفته شده از آن تأثیرگذار باشد. بنابراین تأکید نشریه‌ی ۳۸۵ مبنی بر آنکه در حین عملیات پاشش بتن برای مغزه‌گیری، نحوه‌ی قرار گیری جعبه (افقی، قائم یا شیبدار) باید مطابق با شرایط اجرایی پروژه باشد، صحیح بوده و نحوه‌ی قرار گیری قالب بتنی و جهت پاشش بتن به آن به منظور مغزه‌گیری باید مورد توجه ناظران سازه‌های ساخته شده با بتن پاششی قرار گیرد. بنابراین قالب مکعبی برای دیوارهای پانلی به منظور مغزه‌گیری در شرایط واقعی پروژه‌ها



شکل ۱۲- الگوی ترک در مغزه‌های بتن پاششی نمونه‌ی ایستاده

با توجه به اینکه ترک‌های ایجاد شده در مغزه‌ی B5 در جهت عمود بر راستای بارگذاری است، بنابراین در اثر اعمال بار فشاری، این ترک‌ها در هم فشرده شده و فضای خالی بین آن‌ها پر می‌شود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که مغزه‌ی B5 دارای بیشترین مقاومت در بین مغزه‌های نمونه‌ی ایستاده است که نتایج آزمایش فشاری در مورد مغزه‌ی B5، صحت این موضوع را تأیید می‌کند. با در نظر گرفتن منحنی شکل ۸ مشاهده می‌شود که بیشترین کرنش قائم مربوط به نمونه‌ی B5 بوده که نشان می‌دهد فرض نحوه‌ی ایجاد ترک در نمونه‌ی B5 صحیح است. با توجه به شکل ۱۳ و ۱۴ که به ترتیب نحوه‌ی شکست مغزه‌ی B5 و A5 را در آزمایش فشاری تک محوره نشان می‌دهد، مشاهده می‌شود که نحوه‌ی شکست مغزه‌ی B5 با سایر نمونه‌ها متفاوت بوده است به طوری که در مغزه‌ی A5 و سایر مغزه‌ها ترک‌های ایجاد شده در راستای ارتفاع مغزه ایجاد شده ولی در مغزه‌ی B5 نحوه‌ی ترک خوردگی به صورت ترک‌های توزیع شده در سطح است که این مورد نیز می‌تواند نحوه‌ی ایجاد ترک‌ها در مغزه‌ی B5 را توجیه کند.



شکل ۱۳- نحوه‌ی شکست مغزه‌ی B5

[۹] د. مستوفی نژاد، سازه‌های بتن آرمه، جلد اول، چاپ پنجم، انتشارات ارکان دانش، اصفهان، ۱۳۸۶.

[10] ASTM C469, "standard test method for static modulus of elasticity and poissons ratio of concrete in comprssion." USA, 1987.

[11] L. E. Bryne. Time Dependent Material Properties of Shotcrete for Hard Rock Tunnelling. Doctoral Thesis, *Royal Institute of Technology School of Architectural Engineering*. Stockholm, Sweden, 2014.

[12] ACI Committee 318, " Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-08)." *American concrete Institute*, USA, 2008.

[13] ASTM C597, "Standard Test Method for Pulse Velocity through Concrete." USA, 1991.

[14] J.P. Castagna, M.L. Batzle And R.L. Eastwood. "Relationships between Compressional-Wave and Shear-Wave Velocities in Elastic Silicate Rocks, Geophysics, pp. 571- 581, 1985..

باید به صورت ایستاده و برای سقف‌های پانلی به صورت افقی قرار گیرد. همچنین پیشنهاد می گردد با توجه به اینکه در سازه‌های پانلی، عموماً از بتن پاششی تر استفاده می‌شود، عملیات پاشش بتن به قالب‌های مکعبی با بتن پاششی خشک و در یک مرحله صورت پذیرد تا تفاوت آن با بتن پاششی تر مورد مقایسه قرار گیرد. علاوه بر آن، به منظور تحلیل دقیق‌تر نتایج حاصله توصیه می‌شود که آزمایش‌های انجام شده بر روی تعداد مغزه‌های بیش‌تر انجام گیرد.

۹- مراجع

[1] M. Z. Kabir and M. R. Rahbar. "Experimental relation between non-destructivetest and standard cylinder in shotcrete used in bearing 3D wall panels." Third International Conference on Construction Materials, Vancouver, Canada, Aug. 2005.

[۲] م. ز. کبیر و س. حجازی. "تعیین آزمایشگاهی مدول ارتجاعی بتن پاشیدنی (شاتکریت) مورد استفاده در پانل‌های باربر ساندویچی." اولین کنفرانس ایمن سازی و بهسازی سازه‌ها، تهران، دانشگاه امیرکبیر، ۱۳۸۱.

[۳] آیین‌نامه‌ی بتن ایران (آبا)، نشریه‌ی شماره ی ۱۲۶، معاونت امور فنی، دفتر فنی و تدوین معیارها، انتشارات سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور، ۱۳۸۰.

[4] A. Hubacek, J. Brozovsky. R. Hela. "Comparison of Properties of Shotcrete Tested Using Destructive." *Concrete and Concrete Structures*, vol. 65, pp. 63-8, Jun. 2013.

[5] R. Schütz, D.M. Potts and L. Zdravkovic. "Advanced constitutive modelling of shotcrete: Model formulation and calibration." *Computers and Geotechnics*, vol. 38, pp. 834-45, Jun. 2011.

[6] A. Bentur And C. Jagermann. "Development of Destructive And Non-destructive Testing Methods for Quality Control of Hardened Concrete on Building Sites and Precast Factories." *Research Report No 017-196 (Israel Institute of Technology Building Research Satation*, July. 1977.

[7] N. Petersons. "should standard cube test specimens be replaced by test specimens taken from structures." *Materials and Structures*, vol. 100, pp. 425-35, 1968.

[۸] نشریه. ش. ۳۸۵، " دستور العمل طراحی، ساخت و اجرای سامانه‌های پانلی سه بعدی." ایران: مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، ۱۳۹۱.

An Experimental Study on Shotcrete Used in 3D Panel Structures Determining its Characters

Mehran Zeynalian *

Assistant Professor, Department of Civil Engineering, University of Isfahan

Omid Khaje Khabaz

M.Sc Student, Department of Civil Engineering, University of Isfahan

Alireza Khaje Khabaz

M.Sc Student, Department of Civil Engineering, Payame Noor University - North Tehran Branch

Abstract

In this study, an experimental study on shotcrete used in precast 3D panel structures is presented. The main goals are to identify the structural characteristics of the shotcrete including elastic modulus and poison ratio; that are essential for any numerical analysis which would be carried out by the finite element models. For this purpose, according to No.385 Iranian standard provision which is entitled “the code of practice for design specification manufacturing and construction of 3D panel structures”, two 600x600x150 mm³ boxes were employed; and filled by the shotcrete. It should be mentioned that one box was laid on the ground, whereas the second one was in vertical position; hence, the shotcrete was performed vertically and horizontally, respectively. After 28 days, cylindrical core samples with 14.6 Cm height and 7.3 Cm diameter were taken from both boxes; and they were tested under uniaxial compression tests as well as ultrasonic non-destructive dynamic tests. Of particular interests were the specimens’ stress-strain curves, maximum compression capacity, elastic modulus, and poison ration. The cores which were taken from two boxes were compared in order to investigate the effects of Concrete spraying’s direction on the shotcrete’ specifics.

Keywords: precast 3D panel system, shotcrete, elastic modulus, poison ratio, ultrasonic non-destructive dynamic tests.

*Corresponding author: m.zeynalian@eng.ui.ac.ir

