

ارزیابی مقاومت بتن خودتراکم پلیمری در تیرهای بتن آرمه

رحمت مدن دوست^{۱*}، اصغر وطنی اسکویی^۲ و میلاد رجبی جورشری^۳

^۱ دانشیار دانشکده فنی، دانشگاه گیلان

^۲ دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی

^۳ کارشناس ارشد سازه، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد تاکستان

دریافت ۹۴/۶/۱ پذیرش ۹۴/۱۲/۳

* نویسنده مسئول

چکیده

در این مطالعه ارزیابی مقاومت بتن خود تراکم حاوی ذرات خرد شده ضایعات لوله های PVC در تیرهای بتن آرمه با ابعاد ۲/۱×۰/۵×۰/۳۵ متر با استفاده از روش های مغزه گیری و اولتراسونیک مورد توجه می باشد. دو نسبت آب به مواد پودری ۰/۳۹ و ۰/۴۷ استفاده شده که میکروسیلیس و پودر سنگ آهک به عنوان پرکننده به کار رفته است. همچنین در صدهای مختلف ذرات خرد شده ضایعات لوله های PVC به میزان ۵٪ و ۱۰٪ با رعایت محدودیت های آزمایشات بتن تازه به صورت حجمی جایگزین بخشی از ماسه شده است. نتایج نشان می دهند که روند تغییرات مقاومت بتن در ارتفاع تیرها با استفاده از دو روش یاد شده تقریباً مشابه هم می باشد. با افزایش درصد ذرات PVC تغییرات بیشتر در مقاومت بتن در ارتفاع تیر مشاهده شده است. این افزایش تغییرات برای طرح با نسبت آب به پودر ۰/۴۷ حاوی میکروسیلیس مشهودتر بوده که حداکثر تا ۱۱٪ تغییر بیشتر از بتن کنترل را نشان می دهد.

واژگان کلیدی: بتن خودتراکم، ضایعات لوله های PVC، آزمایشات درجا، اولتراسونیک، مغزه گیری.

۱- مقدمه

تیرهای بتن در ارتفاع مقطع تیرها با یک توزیع نسبتاً یکنواخت از مقاومت کمتر در قسمت های فوقانی به مقاومت بیشتر در قسمت های تحتانی می رسد، که اندازه این تغییرات براساس نوع بتن می باشد. از طرفی میزان تغییرات در اکثر تیرهای ساخته شده از بتن سبک کمتر از بتن نرمال بود.

یکی از معایب بتن عدم همگنی آن می باشد که عواملی همچون تراکم نا مناسب، آب انداختگی و جداسدگی آن را تشدید می کنند. به منظور ایجاد تراکم مناسب، کاهش جداسدگی و آب انداختگی و تسهیل جایگیری بتن به ویژه در مقاطع با تراکم آرماتور، بتن خودتراکم توسعه یافته است. در سال های ۱۹۹۷ و ۱۹۹۹، Khayat و همکاران [۲، ۳]، به ارزیابی مقاومت بتن های خودتراکم و نرمال در المان هایی نظیر دیوار و ستون پرداختند. البته المان های ساخته شده در مقیاس نسبتاً کوچکی بوده است. بر اساس المان های یاد شده تغییرات قابل توجهی بین بتن های خودتراکم و نرمال در اعضای سازه ای ساخته شده توسط آن ها مشاهده نشد. در تحقیقی دیگر که در سال ۲۰۰۱ توسط Zhu و همکاران ارائه شد [۴]، مقاومت بتن خود تراکم در تیرها و ستون ها با استفاده از روش های

تلاش های گسترده ای جهت کنترل کمی و کیفی مقاومت بتن در سازه انجام گردیده و روش های متعددی برای تخمین مقاومت فشاری بتن در محل ابداع شده است. بر اساس مکانیزم حاکم در این روش ها می توان آن ها را به دو گروه روش های غیر مخرب و نیمه مخرب تقسیم نمود. در روش های نیمه مخرب از آن جایی که پارامتر اندازه گیری شده با مقاومت بتن در ارتباط می باشد نسبت به روش های غیر مخرب از درجه اهمیت و اعتبار بیشتری برخوردار می باشند. در زمینه مقاومت بتن در ساختگاه تحقیقات بسیاری صورت گرفته و تأثیر نوع آزمایش بر روی نتایج مورد مطالعه قرار گرفته است. این آزمایشات روی المان های مختلف سازه ای و همچنین انواع مختلف بتن انجام شده است. در سال ۱۹۹۴، Bungey و Madandoust [۱] به بررسی توزیع مقاومت بتن در تیرهای ساخته شده از بتن سبک پرداختند و نتایج را با تیر ساخته شده از بتن نرمال مقایسه کردند. برای این تحقیق ۵ تیر بتن مسلح با مقیاس واقعی، با چهار نوع مختلف بتن سبک و بتن نرمال ساخته شدند و در سن ۲۸ روز تحت آزمایش اولتراسونیک قرار گرفتند. نتایج نشان دادند که مقاومت

۲۵ و ۳۰ جایگزین بخشی از حجم ماسه گردید. نتایج نشان دادند که با افزایش درصد ذرات PVC، مقادیر آزمایش‌های جریان اسلامپ و جعبه L شکل کاهش و زمان جریان اسلامپ ۵۰ سانتی‌متر و قیف V شکل افزایش می‌یابد که در نتیجه مقدار روانی، قابلیت عبوری و پرکنندگی کاهش می‌یابد. در جایگزینی‌های بیش از ۱۵ درصد، علاوه بر عدم ارضای محدوده‌های مورد نظر در ضوابط مربوط به بتن خودتراکم، احتمال وقوع پدیده جدایش نیز افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش درصد ذرات PVC وزن مخصوص، مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مدول الاستیسیته بتن کاهش می‌یابد.

هدف اساسی از انجام این تحقیق بررسی تغییرات مقاومت بتن خودتراکم حاوی ضایعات لوله‌های PVC در تیرهای بتن آرمه ساخته شده در مقیاس واقعی با استفاده از روش‌های غیر مخرب اولتراسونیک و نیمه مخرب مغزه‌گیری و مقایسه نتایج آن‌ها می‌باشد. همچنین تأثیر در صدهای مختلف PVC و نوع پرکننده‌ها شامل پودر سنگ آهک و میکروسلیس و نیز تغییر در نسبت آب به پودر، بر روی نتایج مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- مصالح

در این مطالعه، از سیمان پرتلند نوع ۲ محصول کارخانه هگمتان با وزن مخصوص 3 gr/cm^3 ۳/۱۵، سطح مخصوص بلین $2900 \text{ cm}^2/\text{gr}$ ، مقاومت فشاری ۲۸ روزه 365 kg/cm^2 و همچنین زمان گیرش ابتدایی و نهایی به ترتیب برابر ۱۷۵ و ۲۲۵ دقیقه استفاده شده است. پرکننده‌ها شامل میکروسلیس و پودر سنگ آهک می‌باشند. میکروسلیس با وزن مخصوص 3 gr/cm^3 ۲/۲ و سطح مخصوص $20200 \text{ cm}^2/\text{gr}$ و پودر سنگ آهک با وزن مخصوص 3 gr/cm^3 ۲/۶۵ و سطح مخصوص $5380 \text{ cm}^2/\text{gr}$ می‌باشند. مشخصات شیمیایی سیمان و پرکننده‌ها در جدول (۱) ارائه شده است.

شن و ماسه مصرفی در این مطالعه از معدن سده در مرکز استان گیلان تهیه گردید. وزن مخصوص ظاهری در حالت درون اشباع با سطح خشک برای شن و ماسه به ترتیب $2/66 \text{ gr/cm}^3$ و $2/64 \text{ gr/cm}^3$ می‌باشند. حداکثر اندازه شن مصرفی ۱۹ mm بود.

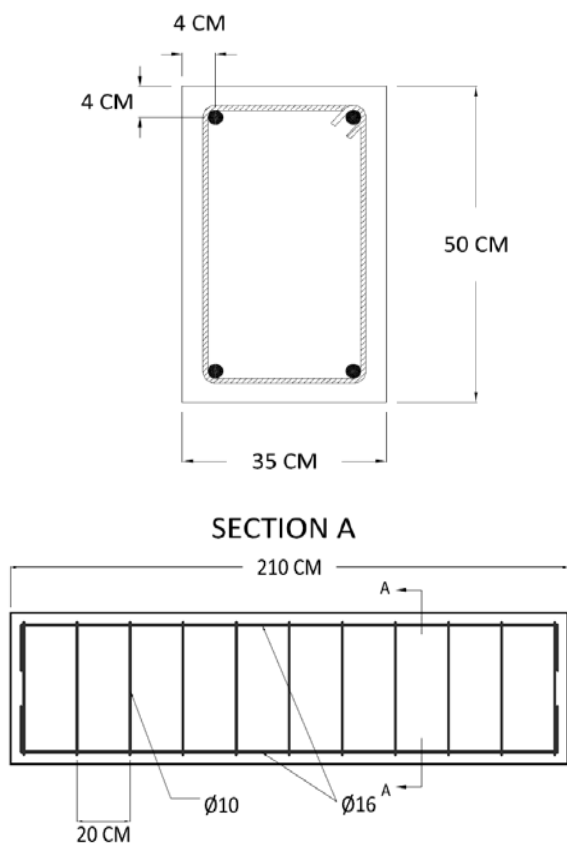
مغزه‌گیری، بیرون کشیدگی و چکش اشمیت مورد بررسی قرار گرفت و همگنی نتایج حاصل با بتن نرمال مقایسه گردید. المان‌های ساخته شده در مقیاس واقعی شامل ستون‌ها با ارتفاع 3000 mm و تیرها با طول 3800 mm بودند. نتایج نشان داد که مقاومت بتن در ارتفاع ستون‌ها از تراز بالا به پایین افزایش می‌یابد و مقایسه تغییرات مقاومت در امتداد ارتفاع ستون‌ها و نیز تغییرات مقاومت در طول تیرها روند مشابهی را نشان می‌دهد. حداکثر میزان این تغییرات در ستون‌ها برابر ۱۵٪ و در تیرها برابر ۷٪ می‌باشد. نتایج همچنین نشان دادند که در هر سه آزمایش انجام گرفته در محل، الگوی تغییرات مشابهی وجود دارد و نیز تغییرات مقاومت بتن در ارتفاع ستون‌ها و در طول تیرها برای بتن خود تراکم اندکی کمتر از بتن نرمال می‌باشد.

یکی از عواملی که باعث شناخته شدن بتن به عنوان مصالحی ممتاز شده است، امکان ساخت بتن از مصالح متفاوت از جمله ضایعات می‌باشد. نظر به این که ضایعات محصولات پلیمری همواره در محیط‌زیست باقی می‌ماند، لذا همواره یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های زیست محیطی استفاده مجدد از این ضایعات انبوه می‌باشد. خصوصیات جالب آن‌ها از قبیل چگالی کم، خاصیت الاستیک بالا و سختی کم مورد توجه محققین قرار گرفته است. پلیمرها انواع مختلفی دارند. یکی از آن‌ها PVC یعنی پلی‌وینیل کلراید می‌باشد که به شکل‌های مختلف از جمله لوله در سراسر جهان تولید می‌شود. نخستین تحقیق در زمینه استفاده از ضایعات PVC در بتن، در سال ۲۰۰۹ توسط Kou و همکاران [۵] صورت گرفت. آن‌ها ذرات خرد شده لوله‌های PVC را با درصدهای مختلف ۰، ۵، ۱۵، ۳۰ و ۴۵ جایگزین بخشی از ماسه به عنوان سنگ‌دانه نمودند و خصوصیات تازه و سخت شده بتن سبک حاوی این ضایعات را مورد بررسی قرار دادند. به طور کلی دو نتیجه مهم به دست آمد. جنبه مثبت نشان داد که بتن‌های تولید شده با ذرات PVC سبک‌تر هستند (چگالی کمتر)، شکل‌پذیری بیشتر، افت و انقباض کمتری دارند و دارای مقاومت بالایی در مقابل نفوذ یون کلراید می‌باشند. جنبه منفی مشخص کرد که کارایی، مقاومت فشاری و مقاومت کششی کاهش پیدا می‌کند. نتایج جمع‌آوری شده اطلاعات مفیدی برای باز مصرف مواد پلاستیک ضایعاتی PVC در بتن سبک‌دانه را نشان می‌دهد. همچنین در سال‌های اخیر مطالعه‌ای توسط مدندوست و همکاران [۶، ۷]، بر روی خصوصیات تازه و سخت شده بتن خودتراکم حاوی ذرات خرد شده ضایعات لوله‌های PVC انجام شد. PVC با درصدهای حجمی ۰، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰،

فوق روان کننده مصرفی در این مطالعه آخرین نسل روان کننده و کاهنده آب بر پایه پلی کربوکسیلات اتر مطابق استاندارد ASTM C1017 [۹] و ASTM C494 TYPE F [۱۰] با چگالی ۱/۱۵ و PH برابر ۶/۵ می باشد.

۲-۲- تیرهای مورد آزمایش

در این مطالعه به منظور بررسی تغییرات مقاومت بتن در المان سازه‌ای، ساخت تیرهایی به ابعاد ۲/۱×۰/۵×۰/۳۵ متر مدنظر قرار گرفت. این ابعاد به منظور نزدیک شدن به شرایط واقعی انتخاب شد. در تیرها از چهار میلگرد طولی نمره ۱۶ (دو تا در بالا و دو تا در پایین) و خاموت‌های نمره ۱۰ به فواصل ۲۰ سانتی‌متر استفاده شد. جزئیات تیر در شکل (۲) نمایش داده شده است.



شکل ۲- جزئیات تیر بتن مسلح

۲-۳- طرح اختلاط بتن

در طرح اختلاط‌های به کار رفته در این مطالعه از دو مقدار مواد پودری (شامل سیمان به علاوه میکروسیلیس یا پودر سنگ آهک) ۴۵۰ و ۳۷۵ کیلوگرم بر متر مکعب، به ترتیب با دو نسبت

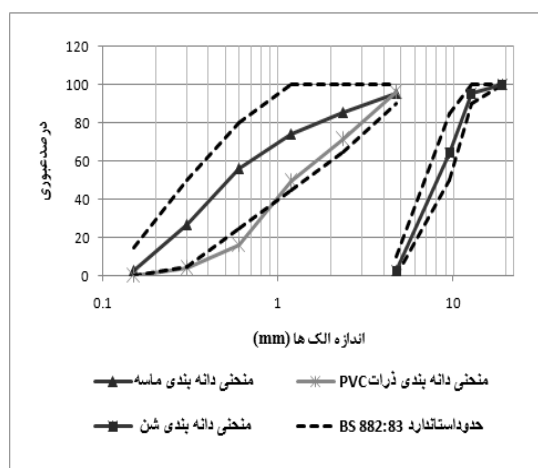
جدول ۱- مشخصات شیمیایی سیمان و پرکننده‌ها

ترکیبات شیمیایی	سیمان (%)	میکروسیلیس (%)	پودر سنگ آهک (%)
SiO ₂	۲۱/۵۴	۹۵/۱	۰/۴۵
Al ₂ O ₃	۴/۹۵	۱/۳۲	۰/۳۳
Fe ₂ O ₃	۳/۸۲	۰/۸۷	۰/۱۴
CaO	۶۳/۲۴	۰/۴۹	۵۲/۳۵
MgO	۱/۵۵	۰/۹۷	۱/۰۵
SO ₃	۲/۴۳	۰/۱	-
K ₂ O	۰/۷۵	۱/۰۱	۰/۰۲
N ₂ O	۰/۴۸	۰/۳۱	۰/۰۶
LOI	۱/۱۵	-	۴۲/۵

در این تحقیق برای فراهم نمودن ذرات PVC خرد شده با ابعادی مشابه ماسه مصرفی از دستگاه آسیاب استفاده گردید. ۴۰ درصد PVC از مشتقات نفت خام است و ۶۰ درصد باقی مانده آن را کلر تشکیل می دهد. ذرات PVC دارای مشخصات مکانیکی شامل مقاومت کششی، خمشی و فشاری به ترتیب برابر ۵۱ MPa، ۱۰۰ MPa و ۶۵ MPa و همچنین ضریب انبساط حرارتی ۱/۶۱ 1/c^o می باشد. مشخصات فیزیکی سنگدانه‌ها از جمله ذرات PVC خرد شده در جدول (۲) و منحنی دانه بندی آن‌ها همراه با محدوده درصد عبوری استاندارد BS 882:1983 [۸] در شکل (۱) آمده است.

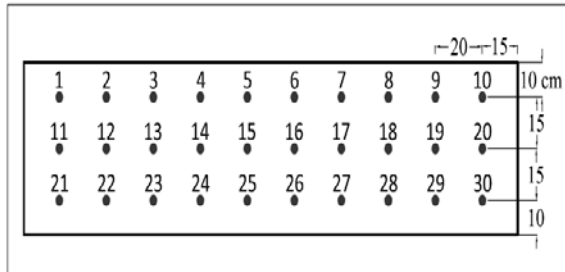
جدول ۲- مشخصات فیزیکی سنگدانه‌ها

ذرات PVC	ماسه	شن	سنگدانه‌ها
۱/۴	۲/۶۴	۲/۶۶	وزن مخصوص ظاهری (gr/cm ³)
-	۲/۲۵	۱/۲۱	درصد جذب آب (%)
۵۶۹	۱۶۹۷	۱۶۳۵	وزن مخصوص توده‌ای (kg/m ³)



شکل ۱- منحنی دانه بندی سنگدانه‌ها

پذیرفت. قرائت در دو وجه روبروی نمونه‌ها صورت گرفت که مقدار میانگین آن‌ها ثبت گردید. موقعیت انجام آزمایشات اولتراسونیک و همچنین نحوه اجرای آن در محل به ترتیب در شکل‌های (۳) و (۴) مشاهده می‌شود.



شکل ۳- موقعیت آزمایش اولتراسونیک



شکل ۴- دستگاه اولتراسونیک و نحوه انجام آزمایش در محل

آب به پودر ۰/۳۹ و ۰/۴۷ استفاده شد. میکروسیلیس (Sf) و پودر سنگ آهک (Lp) به ترتیب به میزان ۱۰٪ و ۲۰٪ وزن مواد پودری به صورت مجزا به کار برده شد. همچنین در این مخلوط-ها، دو درصد مختلف ذرات خرد شده PVC ۵٪ و ۱۰٪ با رعایت محدودیت‌های بتن خودتراکم تازه به صورت حجمی جایگزین ماسه شد. با احتساب بتن‌های کنترل در مجموع ۱۲ طرح برای ساخت تیرها در نظر گرفته شد. جدول (۳) میزان مصالح مصرفی در هر یک از اختلاط‌ها را نشان می‌دهد.

۴-۲- آزمایشات انجام شده

کلیه آزمایش‌های صورت گرفته بر روی تیر در سن ۲۸ روز و در نمونه‌های آزمایشگاهی در سنین ۳، ۷، ۱۴ و ۲۸ روز انجام گرفت. نمونه‌های آزمایشگاهی به صورت مکعبی و در شرایط عمل‌آوری خشک (مشابه تیرها) و مرطوب تا سن آزمایش نگه‌داری شدند.

۴-۲-۱- آزمایش اولتراسونیک

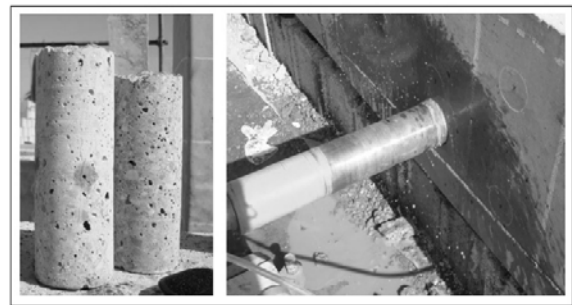
آزمایش اولتراسونیک با استفاده از دستگاه پاندیت با فرکانس ۵۴ kHz در ۳۰ نقطه تیر و در سه تراز مختلف تحتانی، میانی و فوقانی (به ترتیب با ارتفاع ۱۰، ۲۵ و ۴۰ سانتی‌متر از پایین تیر) که در هر تراز ۱۰ نقطه انجام شد. همچنین آزمایش اولتراسونیک در تمام سنین مذکور بر روی سه نمونه مکعبی ۱۵ سانتی‌متری و در شرایط عمل‌آوری خشک (مشابه تیرها) صورت

جدول ۳- طرح اختلاط‌های به کار رفته (kg/m^3)

نوع بتن	شن	ماسه	سیمان	میکروسیلیس	پودر سنگ آهک	نسبت آب به سیمان	نسبت آب به پودر	آب	PVC (%)	PVC	فوق روان کننده
1.S0.39Sf-P0	۸۰۰	۹۴۴	۴۰۵	۴۵	-	۰/۴۳	۰/۳۹	۱۷۵	٪۰	۰	۳/۳
2.S0.39Sf-P5	۸۰۰	۸۹۶	۴۰۵	۴۵	-	۰/۴۳	۰/۳۹	۱۷۵	٪۵	۱۶	۳/۵
3.S0.39Sf-P10	۸۰۰	۸۴۸	۴۰۵	۴۵	-	۰/۴۳	۰/۳۹	۱۷۵	٪۱۰	۳۲	۳/۷
4.S0.39Lp-P0	۸۰۰	۹۴۹	۳۶۰	-	۹۰	۰/۴۹	۰/۳۹	۱۷۵	٪۰	۰	۳
5.S0.39Lp-P5	۸۰۰	۹۰۱	۳۶۰	-	۹۰	۰/۴۹	۰/۳۹	۱۷۵	٪۵	۱۶	۳/۲
6.S0.39LpP10	۸۰۰	۸۵۳	۳۶۰	-	۹۰	۰/۴۹	۰/۳۹	۱۷۵	٪۱۰	۳۲	۳/۴
7.S0.47Sf-P0	۸۰۰	۱۰۰۹	۳۳۷/۵	۳۷/۵	-	۰/۵۲	۰/۴۷	۱۷۵	٪۰	۰	۲/۶
8.S0.47Sf-P5	۸۰۰	۹۵۸	۳۳۷/۵	۳۷/۵	-	۰/۵۲	۰/۴۷	۱۷۵	٪۵	۱۷	۲/۸
9.S0.47Sf-P10	۸۰۰	۹۰۷	۳۳۷/۵	۳۷/۵	-	۰/۵۲	۰/۴۷	۱۷۵	٪۱۰	۳۴	۳/۱
10.S0.47Lp-P0	۸۰۰	۱۰۱۲	۳۰۰	-	۷۵	۰/۵۸	۰/۴۷	۱۷۵	٪۰	۰	۲/۴
11.S0.47Lp-P5	۸۰۰	۹۶۱	۳۰۰	-	۷۵	۰/۵۸	۰/۴۷	۱۷۵	٪۵	۱۷	۲/۶
12.S0.47Lp-	۸۰۰	۹۱۰	۳۰۰	-	۷۵	۰/۵۸	۰/۴۷	۱۷۵	٪۱۰	۳۴	۲/۹

۲-۴-۲- آزمایش مغزه‌گیری

آزمایش مغزه‌گیری به قطر ۷۵ میلی‌متر روی هر تیر در تعداد محدودی از نقاط آزمایش اولتراسونیک و در ترازهای مختلف تحتانی، میانی و فوقانی انجام گرفت. نمونه‌های مغزه‌گیری شده با استفاده از دستگاه برش به نسبت طول به قطر ۲ برش داده شدند و پس از آن کلاهدک‌گذاری با استفاده از مخلوط گوگرد و ماسه انجام شد. در شکل (۵) شیوه مغزه‌گیری و نمونه‌های مغزه‌گیری مشاهده می‌شود. در نهایت نمونه‌های آماده شده تحت آزمایش مقاومت فشاری قرار گرفتند.



شکل ۵- مغزه‌گیری و نمونه‌های مغزه‌گیری شده

افزایش زمان لازم برای رسیدن قطر بتن به ۵۰ سانتی‌متر با افزایش PVC، می‌تواند مربوط به دانه‌بندی درشت‌تر PVC در مقایسه با ماسه مصرفی و شکل نامتعارف ذرات PVC و عدم جذب آب آن باشد. طرح اختلاط‌های حاوی پودر سنگ آهک دارای جریان اسلامپ و نسبت h_2/h_1 بیشتر و زمان T-50 و زمان تخلیه از قیف V کمتری نسبت به طرح‌های حاوی میکروسیلیس هستند، که خصوصیات خود تراکمی و جریان‌پذیری بهتری را نشان می‌دهند. با توجه به ثابت بودن نسبت آب به مواد پودری، در مخلوط‌های حاوی میکروسیلیس نیاز به مقدار فوق‌روان‌کننده بیشتری برای رسیدن به کارایی مطلوب می‌باشد. اما محدودیت استفاده از فوق‌روان‌کننده به دلیل تأثیرات منفی آن بر روی مقاومت و افزایش احتمال جداسازی سبب می‌شود که نتوان مقدار آن را در مخلوط حاوی میکروسیلیس خیلی بالا برد. لذا طرح‌های حاوی میکروسیلیس در مقایسه با پودر سنگ آهک جریان‌پذیری کمتری دارند. در مطالعه‌ای که توسط Altuntas و Turkel [۱۲] بر روی ملات‌های خودتراکم انجام شد نظیر چنین نتیجه‌ای نیز حاصل گردید. نتایج آزمایشات در جدول (۴) ارائه شده است.

جدول ۴- خصوصیات بتن تازه

جعبه L (h_2/h_1)	قیف (s)V	T-50 (s)	جریان اسلامپ (mm)	طرح اختلاط
حدود مجاز EFNARC				
۰/۸-۱	۶-۱۲	۲-۵	۶۵۰-۸۰۰	
۰/۹۱	۶/۷	۳/۸	۷۳۰	S0.39Sf-P0
۰/۸۸	۷/۳	۳/۸	۷۱۵	S0.39Sf-P5
۰/۸۴	۸/۱	۴/۱	۶۸۵	S0.39Sf-P10
۰/۹۴	۶/۱	۳/۵	۷۵۰	S0.39Lp-P0
۰/۹۱	۶/۶	۳/۶	۷۳۵	S0.39Lp-P5
۰/۸۷	۷/۴	۳/۹	۷۲۰	S0.39Lp-
۰/۸۸	۷/۵	۴	۷۱۵	S0.47Sf-P0
۰/۸۶	۷/۸	۴/۱	۶۹۰	S0.47Sf-P5
۰/۸۲	۸/۶	۴/۳	۶۵۵	S0.47Sf-P10
۰/۹۲	۶/۸	۳/۸	۷۳۵	S0.47Lp-P0
۰/۸۹	۷/۲	۳/۹	۷۱۵	S0.47Lp-P5
۰/۸۴	۷/۹	۴/۲	۶۸۰	S0.47Lp-

۳- نتایج و تحلیل

۳-۱- خصوصیات بتن تازه

پس از ساخت بتن خودتراکم خصوصیات بتن تازه مورد آزمایش قرار گرفت. به طور کلی همه طرح اختلاط‌ها در محدوده مجاز آزمایشات انجام شده مطابق EFNARC [۱۱] قرار دارند و نیازهای بتن خود تراکم را برآورده می‌سازند. نتایج نشان می‌دهد که افزایش ذرات PVC در بتن خودتراکم برای هر دو نوع مواد پودری میکروسیلیس (Sf) و پودر سنگ آهک (Lp) و نیز هر دو نسبت آب به مواد پودری، منجر به کاهش جریان اسلامپ و کاهش نسبت h_2/h_1 در نتایج آزمایش جعبه L (قابلیت عبور) و نیز افزایش زمان جریان اسلامپ ۵۰ سانتی‌متر و زمان تخلیه بتن از قیف V می‌گردد. اختلاف بین وزن مخصوص و شکل هندسی تیز گوشه و پولکی ذرات PVC موجب می‌شود که مقدار جداسازی و شیردهی افزایش و روانی کاهش یابد که در نتیجه از میزان جریان اسلامپ کاسته می‌شود. همچنین با افزایش ذرات PVC میزان فوق‌روان‌کننده نیز بیشتر می‌شود که احتمال وقوع پدیده جداسازی در بتن زیادتر خواهد شد. افزایش جداسازی و کاهش میزان روانی می‌تواند از دلایل کاهش زمان تخلیه بتن از قیف V و نیز کاهش توانایی عبور در آزمایش جعبه L، با افزایش ذرات PVC باشد.

جدول ۵- مقادیر مقاومت فشاری و سرعت امواج اولتراسونیک برای نمونه‌های مکعبی

سرعت امواج اولتراسونیک (km/s)				مقاومت فشاری (MPa)				طرح اختلاط
روز ۲۸	روز ۱۴	روز ۷	روز ۳	روز ۲۸	روز ۱۴	روز ۷	روز ۳	
۴/۸۵	۴/۷۵	۴/۵۴	۴/۴۰	۴۵/۷۳	۴۱/۵۶	۳۸/۱۵	۲۹/۵۱	S0.39Sf-P0
۴/۷۷	۴/۶۸	۴/۵۳	۴/۳۹	۴۲/۵۵	۳۸/۳۷	۳۵/۴۱	۲۷/۲۳	S0.39Sf-P5
۴/۷۰	۴/۶۲	۴/۴۷	۴/۳۹	۴۱/۵۶	۳۶/۲۹	۳۲/۷۱	۲۵/۸۴	S0.39Sf-P10
۴/۷۳	۴/۵۸	۴/۴۹	۴/۱۸	۳۸/۲۱	۳۶/۳۸	۳۲/۲۹	۲۷/۲۴	S0.39Lp-P0
۴/۵۷	۴/۵۵	۴/۴۱	۴/۱۷	۳۴/۴۶	۳۳/۸۷	۲۷/۴۳	۲۲/۵۹	S0.39Lp-P5
۴/۵۳	۴/۴۱	۴/۳۴	۴/۲۳	۳۳/۸۱	۳۰/۲۵	۲۸/۱۹	۲۱/۸۹	S0.39Lp-P10
۴/۶۹	۴/۶۰	۴/۴۸	۴/۲۵	۳۹/۵۲	۳۷/۳۹	۳۳/۶۴	۲۱/۴۳	S0.47Sf-P0
۴/۶۲	۴/۵۷	۴/۴۳	۴/۲۱	۳۶/۷۵	۳۲/۸۳	۲۸/۶۴	۱۸/۹۴	S0.47Sf-P5
۴/۵۶	۴/۴۸	۴/۴۳	۴/۲۴	۳۴/۴۹	۳۱/۲۷	۲۶/۴۱	۱۸/۹۰	S0.47Sf-P10
۴/۵۴	۴/۴۸	۴/۳۷	۴/۱۷	۳۴/۱۱	۳۱/۲۴	۲۹/۹۶	۲۲/۰۸	S0.47Lp-P0
۴/۴۹	۴/۴۳	۴/۳۹	۴/۱۶	۳۲/۵۸	۲۸/۳۹	۲۶/۸۴	۲۰/۱۶	S0.47Lp-P5
۴/۴۲	۴/۳۴	۴/۳۲	۴/۱۵	۳۰/۳۹	۲۸/۶۳	۲۴/۸۱	۱۸/۹۵	S0.47Lp-P10

$$f_c = ae^{bv} \quad (1)$$

ضرایب a و b برای هر یک از این روابط همراه با ضریب همبستگی (R^2) در جدول (۶) آمده است. با قرار دادن سرعت امواج اولتراسونیک نقاط مختلف تیر در این رابطه، مقاوت معادل مکعبی در آن نقاط به دست می‌آید. میانگین مقاومت‌های معادل مکعبی در هر تراز در جدول (۷) ارائه شده است.

جدول ۶- ضرایب a و b و ضریب همبستگی (R^2)

طرح اختلاط	ضریب a	ضریب b	ضریب همبستگی (R^2)
S0.39Sf-P0	۰/۶۴۰۲	۰/۸۸۲۴	۰/۹۰۸
S0.39Sf-P5	۰/۲۲۲۵	۱/۱۰۴۰	۰/۹۳۶
S0.39Sf-P10	۰/۱۰۶۵۴	۱/۳۷۳۵	۰/۹۲۶
S0.39Lp-P0	۱/۸۸۴۰	۰/۶۳۸۶	۰/۹۶۹
S0.39Lp-P5	۰/۲۵۷۱	۱/۰۶۹۲	۰/۹۷۷
S0.39Lp-P10	۰/۱۰۵۶۸	۱/۴۱۸۱	۰/۹۳۶
S0.47Sf-P0	۰/۱۰۵۳۱	۱/۴۲۱۷	۰/۹۴۹
S0.47Sf-P5	۰/۱۰۲۶۵	۱/۵۶۵۴	۰/۹۸۴
S0.47Sf-P10	۰/۱۰۰۵۳	۱/۹۲۸۳	۰/۹۸۶
S0.47Lp-P0	۰/۱۱۹۶۰	۱/۱۳۸۱	۰/۹۵۹
S0.47Lp-P5	۰/۱۰۶۲۳	۱/۳۸۶۷	۰/۹۸۲
S0.47Lp-P10	۰/۱۰۱۰۵	۱/۸۰۷۷	۰/۹۵۲

۳-۲- خصوصیات بتن سخت شده

آزمایش مقاومت فشاری در سنین ۳، ۷، ۱۴ و ۲۸ بر روی نمونه‌های مکعبی ۱۵ سانتی‌متری و در دو شرایط مختلف خشک (مشابه تیرها) و مرطوب انجام شد. نتایج مقاومت فشاری سرعت امواج اولتراسونیک در نمونه‌ها در شرایط خشک در جدول (۵) ارائه شده است.

نتایج نشان می‌دهند که طرح‌های حاوی میکروسیلیس مقاومت بالاتری نسبت به طرح‌های حاوی پودر سنگ داشتند. این نتیجه به دلیل وجود ذرات بسیار ریز میکروسیلیس است که با پخش شدن در ماتریس خمیر سیمان، کانون‌های واکنش برای هیدراتاسیون سیمان را فراهم می‌کند. این امر موجب تسریع واکنش و حرارت‌زایی ترکیبات سیمان و افزایش مقاومت فشاری می‌شود. با تغییر نسبت آب به پودر از ۰/۳۹ به ۰/۴۷ میزان مقاومت‌ها کاسته می‌شود. همچنین با افزایش درصد ذرات PVC مقاومت نمونه‌ها به دلایلی از قبیل کمتر بودن مدول الاستیسیته ذرات PVC از خمیر سیمان اطراف آن و چسبندگی کم بین این ذرات و خمیر سیمان کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش درصد جایگزینی PVC سرعت عبور امواج اولتراسونیک نیز کاهش می‌یابد. این کاهش می‌تواند به دلیل افزایش منافذ مویینه و ریز ترک‌ها در پیرامون ذرات PVC باشد.

۳-۳- مقاومت معادل مکعبی بر اساس آزمایش اولتراسونیک

با استفاده از مقادیر جدول (۵) و رابطه نمایی (۱)، منحنی رگرسیون برای هر یک از طرح اختلاط‌ها مهیا شد و روابط بین مقاومت فشاری و سرعت امواج اولتراسونیک به دست آمد.

جدول ۷- میانگین مقاومت‌های معادل مکعبی در ترازهای مختلف (MPa)

آزمایش مغزه‌گیری			آزمایش اولتراسونیک			طرح اختلاط
موقعیت تراز تیر						
تحتانی	میانی	فوقانی	تحتانی	میانی	فوقانی	
۴۵/۵۳	۴۴/۱۶	۴۲/۵۴	۴۶/۹۷	۴۵/۴۲	۴۴/۳۹	S0.39Sf-P0
۴۲/۰۴	۳۹/۹۸	۳۸/۵۱	۴۳/۶۱	۴۱/۵۵	۳۹/۷۱	S0.39Sf-P5
۴۰/۹۶	۳۷/۳۴	۳۴/۹۱	۴۱/۹۵	۳۹/۳۳	۳۶/۰۷	S0.39Sf-P10
۳۹/۱۵	۳۸/۶۸	۳۸/۰۶	۳۹/۸۸	۳۹/۱۰	۳۸/۵۳	S0.39Lp-P0
۳۶/۱۹	۳۵/۳۴	۳۴/۴۹	۳۵/۶۲	۳۴/۷۲	۳۳/۳۷	S0.39Lp-P5
۳۵/۱۳	۳۳/۸۹	۳۱/۷۶	۳۴/۲۳	۳۲/۸۰	۳۰/۵۱	S0.39Lp-P10
۳۹/۵۴	۳۶/۸۳	۳۵/۴۸	۴۱/۵۹	۳۹/۵۲	۳۷/۹۲	S0.47Sf-P0
۳۶/۷۱	۳۳/۵۶	۳۱/۳۳	۳۷/۷۶	۳۴/۸۶	۳۲/۸۵	S0.47Sf-P5
۳۵/۲۱	۳۰/۷۸	۲۷/۷۴	۳۵/۷۴	۳۱/۵۳	۲۸/۷۴	S0.47Sf-P10
۳۴/۰۱	۳۲/۹۰	۳۱/۸۳	۳۵/۰۱	۳۳/۷۰	۳۳/۱۱	S0.47Lp-P0
۳۱/۷۴	۲۹/۶۱	۲۹/۱۰	۳۲/۹۰	۳۱/۱۲	۲۹/۸۲	S0.47Lp-P5
۳۱/۰۰	۲۷/۹۸	۲۶/۵۵	۳۱/۶۱	۲۸/۲۱	۲۶/۹۶	S0.47Lp-P10

حاصل از این دو آیین‌نامه اختلاف ناچیزی دارند و در واقع یکدیگر را تأیید می‌کنند.

جدول ۸- میانگین مقاومت‌های معادل مکعبی در تراز میانی بر اساس آیین‌نامه‌های آبا و BS

مقاومت معادل مکعبی (MPa)		مقاومت نمونه مکعبی (MPa)	طرح اختلاط
بر اساس آیین‌نامه آبا	بر اساس آیین‌نامه BS		
۴۴/۵۸	۴۴/۱۶	۴۵/۷۳	S0.39Sf-P0
۴۰/۸۴	۳۹/۹۸	۴۲/۵۵	S0.39Sf-P5
۳۸/۴۷	۳۷/۳۴	۴۱/۵۶	S0.39Sf-
۳۹/۶۷	۳۸/۶۸	۳۸/۲۱	S0.39Lp-
۳۶/۶۷	۳۵/۳۴	۳۴/۴۶	S0.39Lp-
۳۵/۳۷	۳۳/۸۹	۳۳/۸۱	S0.39Lp-
۳۸/۰۱	۳۶/۸۳	۳۹/۵۲	S0.47Sf-P0
۳۵/۰۸	۳۳/۵۶	۳۶/۷۵	S0.47Sf-P5
۳۲/۵۹	۳۰/۷۸	۳۴/۴۹	S0.47Sf-
۳۴/۴۹	۳۲/۹۰	۳۴/۱۱	S0.47Lp-
۳۱/۵۴	۲۹/۶۱	۳۲/۵۸	S0.47Lp-
۳۰/۰۸	۲۷/۹۸	۳۰/۳۹	S0.47Lp-

۳-۵- بررسی تغییرات مقاومت بتن در ارتفاع تیر

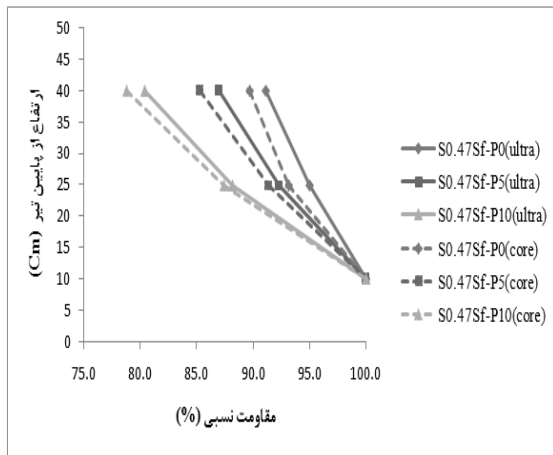
همان‌طور که در جدول (۷) مشاهده می‌شود، مقاومت بتن در ارتفاع کلیه تیرها از تراز پایین به سمت تراز بالا کاهش یافته است. این پدیده احتمالاً در نتیجه تأثیر پدیده آب انداختن و

۳-۴- مقاومت معادل مکعبی بر اساس آزمایش مغزه‌گیری

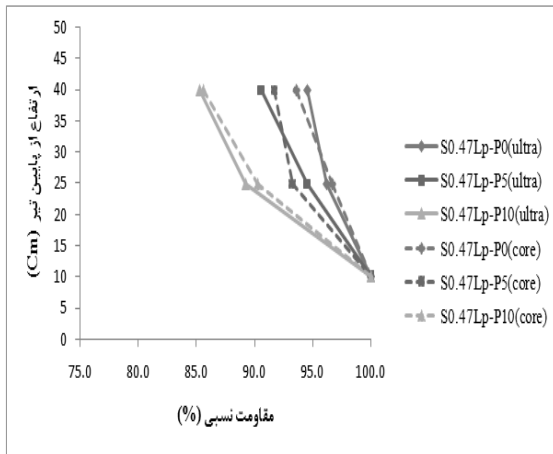
برای ارزیابی مقاومت بتن با استفاده از مغزه‌های گرفته شده، از رابطه‌ای که توسط BS1881:part120 [۱۳] برای مغزه‌های تهیه شده به صورت افقی پیشنهاد شده استفاده گردید. Concrete Society [۱۴] استفاده از این رابطه را برای مغزه‌های با قطر ۵۰ میلی‌متر و بیشتر به دلیل اختلاف کم بین مقاومت مغزه‌های بزرگ‌تر و این مغزه‌ها، توصیه کرده است.

$$\text{مقاومت معادل مکعبی} = \frac{2.5f_{\lambda}}{1.5 + \left(\frac{1}{\lambda}\right)} \quad (۲)$$

f_{λ} در این رابطه مقاومت مغزه‌هایی با نسبت طول به قطر λ می‌باشد. میانگین مقاومت‌های معادل مکعبی حاصل از آزمایش مغزه‌گیری در ترازهای مختلف تحتانی، میانی و فوقانی با استفاده از رابطه BS در جدول (۷) ارائه شده است. همچنین برای مقایسه رابطه BS با آیین‌نامه بتن ایران (آبا) [۱۵]، میانگین مقاومت‌های معادل مکعبی به عنوان مثال در تراز میانی با استفاده از آیین‌نامه آبا محاسبه شده است. بر اساس آیین‌نامه آبا برای تبدیل مقاومت مغزه به مقاومت معادل مکعبی، ابتدا مقاومت مغزه از نظر اندازه اصلاح شده و سپس بر ضریب ۰/۸۵ تقسیم می‌شود و در نهایت مقدار به دست آمده به مقاومت نمونه مکعبی معادل تبدیل می‌شود. میانگین مقاومت‌های معادل مکعبی در تراز میانی بر اساس آیین‌نامه‌های آبا و BS، در جدول (۸) ارائه شده و با هم مقایسه گردیده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نتایج



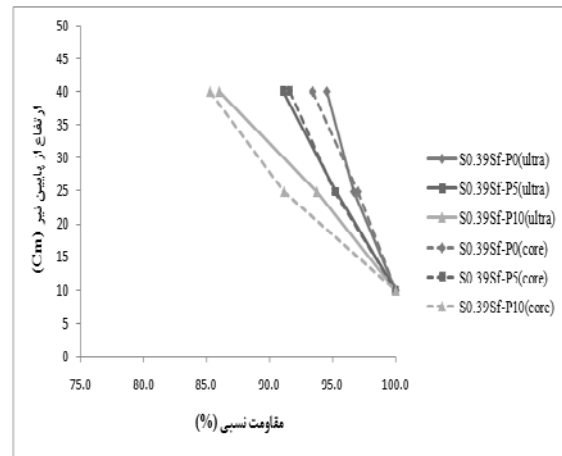
شکل ۸- تغییرات مقاومت بتن در ارتفاع تیرهای حاوی میکروسیلیس با $w/p=0.47$



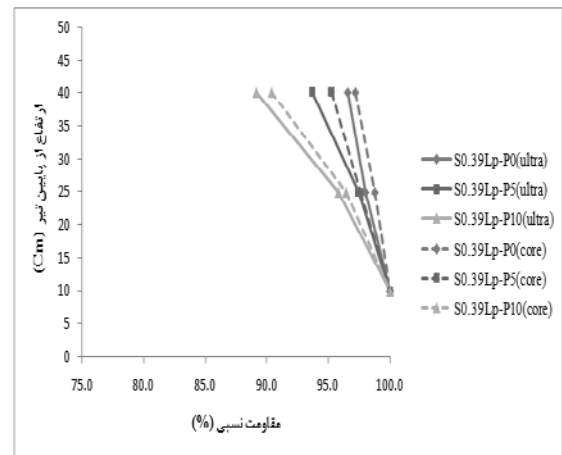
شکل ۹- تغییرات مقاومت بتن در ارتفاع تیرهای حاوی پودر سنگ آهک با $w/p=0.47$

با افزایش درصد ذرات PVC مشاهده می‌شود که در هر دو نسبت آب به مواد پودری و در هر دو نوع پرکننده، درصد کاهش مقاومت از تراز تحتانی به سمت تراز فوقانی بیشتر شده و تغییرات مقاومت در ارتفاع تیر افزایش می‌یابد. میزان این افزایش برای نسبت آب به پودر 0.47 در مقایسه با 0.39 و نیز برای میکروسیلیس نسبت به پودر سنگ آهک بیشتر و ملموس‌تر است و تأثیر ذرات PVC در آن‌ها مشهودتر می‌باشد. به طور کلی با اضافه کردن 10% ذرات PVC تغییرات مقاومت در ارتفاع تیر، حداکثر به میزان 11% نسبت به بتن کنترل بیشتر شده که این میزان در طرح با نسبت آب به پودر 0.47 و حاوی میکروسیلیس مشاهده شده است. علت افزایش تغییرات با زیاد شدن ذرات PVC را می‌توان به دلیل افزایش پدیده جداسازی و آب

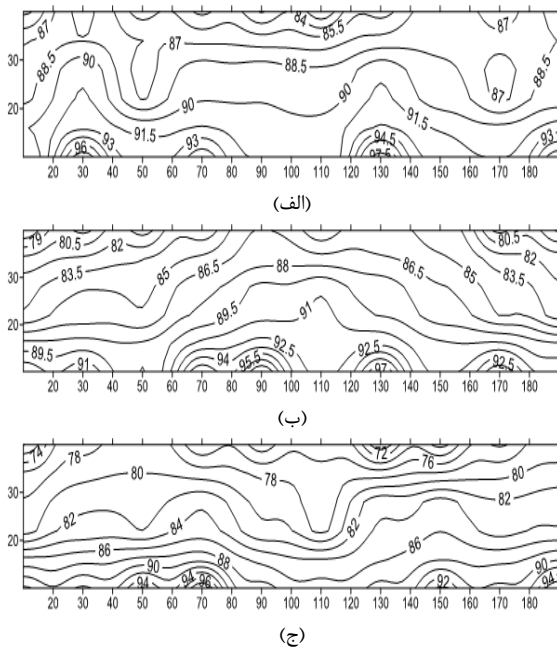
جداسازی و همچنین آثار هیدرواستاتیک بتن در ارتفاع تیرها می‌باشد. چنین روندی در مطالعات Bungey و Madandoust [۱] بر روی تیرهای ساخته شده از بتن معمولی و سبک نیز مشاهده شده است. با افزایش درصد ذرات PVC برای هر دو نسبت آب به مواد پودری و هر دو نوع پرکننده، مقاومت‌ها در همه ترازها کاهش می‌یابد. همچنین مقاومت‌های حاصله در تیرهای ساخته شده از میکروسیلیس در تمامی ترازها بیشتر از پودر سنگ آهک می‌باشد. روند تغییرات مقاومت معادل مکعبی به دست آمده در ارتفاع تیرها، بر حسب درصدی از مقدار آن در تراز تحتانی با استفاده از دو آزمایش اولتراسونیک و مغزه‌گیری در شکل‌های (۶) تا (۹) نشان داده شده است.



شکل ۶- تغییرات مقاومت بتن در ارتفاع تیرهای حاوی میکروسیلیس با $w/p=0.39$



شکل ۷- تغییرات مقاومت بتن در ارتفاع تیرهای حاوی پودر سنگ آهک با $w/p=0.39$



شکل ۱۰- نمودار خطوط هم‌میزان برای تیر ساخته شده با طرح: (الف) S0.47Sf-P0، (ب) S0.47Sf-P5، (ج) S0.47Sf-P1

همان‌طور که مشاهده می‌شود، در تمامی تیرها روند تغییرات مقاومت بتن در ارتفاع کاملاً مشهود است. همچنین آشکار است که با افزایش درصد ذرات PVC تغییرات مقاومت بتن افزایش یافته است. به منظور اطمینان از یکنواختی بتن در طول تیر، پراکندگی مقاومت بتن نسبت به میانگین (ضریب تغییرات) در تراز میانی به عنوان نماینده ترازهای موجود محاسبه گردید. با توجه به نتایج به دست آمده در جدول (۹)، ضریب تغییرات مقاومت در طول تیرها بین ۱ الی ۵ درصد بود که نشان دهنده یکنواختی مناسب بتن‌های خودتراکم در طول تیر می‌باشد.

جدول ۹- ضریب تغییرات و میانگین مقاومت‌های تراز میانی تیرها

طرح اختلاط	میانگین مقاومت‌ها (MPa)	ضریب تغییرات (%)
S0.39Sf-P0	۴۵/۴۲	۲/۸۴
S0.39Sf-P5	۴۱/۵۵	۲/۹۰
S0.39Sf-P10	۳۹/۳۳	۳/۶۹
S0.39Lp-P0	۳۹/۱۰	۱/۸۲
S0.39Lp-P5	۳۴/۷۲	۲/۴۵
S0.39Lp-P10	۳۲/۸۰	۲/۷۰
S0.47Sf-P0	۳۹/۵۲	۲/۹۵
S0.47Sf-P5	۳۴/۸۶	۴/۱۸
S0.47Sf-P10	۳۱/۵۳	۴/۷۶
S0.47Lp-P0	۳۳/۷۰	۲/۱۶
S0.47Lp-P5	۳۱/۱۲	۲/۵۱
S0.47Lp-P10	۲۸/۲۱	۳/۹۳

انداختگی و کاهش روانی ناشی از ازدیاد این ذرات دانست که از همگنی بتن می‌کاهد. با ازدیاد نسبت آب به پودر از ۰/۳۹ به ۰/۴۷ تغییرات مقاومت در ارتفاع تیر افزایش یافته و درصد کاهش مقاومت بیشتر شده است. در طرح‌های با نسبت آب به مواد پودری کمتر ($w/p=0/39$)، دارا بودن مقدار سیمان بیشتر و در نتیجه لزجت بیشتر، مانع صعود بیشتر سنگدانه‌های سبک‌تر به بالای مخلوط می‌شود و از یکنواختی بیشتری برخوردار می‌باشد. تغییرات مقاومت بتن برای طرح‌های حاوی پودر سنگ آهک کمتر از بتن‌های خودتراکم حاوی میکروسیلیس نظیر می‌باشد. این کاهش در تغییرات مقاومت را می‌توان احتمالاً به دلیل روانی و جریان‌پذیری در نتیجه همگنی بیشتر طرح‌های حاوی پودر سنگ آهک انتظار داشت.

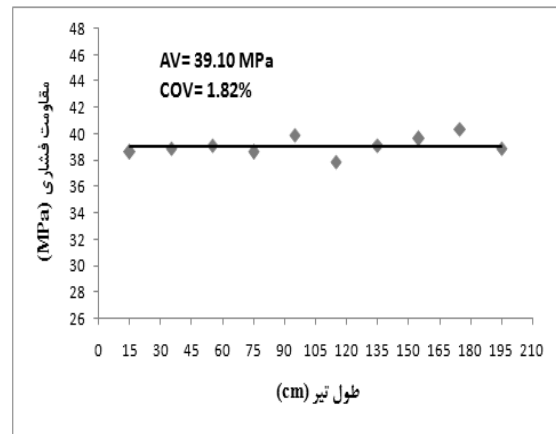
به طور کلی ضعیف‌ترین عملکرد مربوط به طرح S0.47Sf-P10 می‌باشد که کاهش مقاومت آن در تراز فوقانی و میانی نسبت به تراز تحتانی به ترتیب ۱۹/۶ و ۱۱/۸ درصد بر مبنای آزمایش اولتراسونیک و ۲۱/۲ و ۱۲/۶ درصد بر مبنای آزمایش مغزه‌گیری بوده است. این نتایج برای طرح S0.39Lp-P0 به ترتیب ۳/۴ و ۲ بر مبنای آزمایش اولتراسونیک و همچنین ۲/۷ و ۱/۲ درصد بر مبنای آزمایش مغزه‌گیری می‌باشد. تغییرات مقاومت بتن در کلیه تیرهای بتن خودتراکم بدون ذرات PVC به جز طرح با نسبت آب به پودر ۰/۴۷ و حاوی میکروسیلیس (S0.47Sf-P0) از نتایج به دست آمده بر روی تیرهای ساخته شده از بتن سبک و نرمال کمتر بوده است [۱]. تیر حاوی طرح S0.47Sf-P0 هم فقط از یکی از تیرهای ساخته شده با بتن سبک تغییرات بیشتری داشت. همچنین کلیه تیرهای ساخته شده (با و بدون PVC) تغییرات کمتری در مقاومت بتن نسبت به تیر ساخته شده با بتن نرمال داشتند. این کاهش در تغییرات مقاومت بتن را می‌توان به دلیل همگنی بتن خودتراکم انتظار داشت. نتایج نشان می‌دهد که هر دو روش اولتراسونیک و مغزه‌گیری تقریباً تغییرات مشابهی در مقاومت بتن را نشان می‌دهند. در شکل (۱۰) نمودار خطوط هم‌میزان مقاومت نسبی بتن برحسب درصدی از بیشترین مقاومت حاصله در تراز تحتانی با استفاده از نتایج آزمایش اولتراسونیک برای طرح حاوی میکروسیلیس با نسبت آب به پودر ۰/۴۷ که بیشترین تغییرات مقاومت را در ارتفاع داشته، نشان داده شده است. با استفاده از خطوط هم‌میزان می‌توان مقایسه بهتری از تغییرات مقاومت بتن در تیرها چه در ارتفاع و طول تیر نتیجه گرفت.

۳-۶- مقایسه مقاومت معادل مکعبی در ساختگاه نسبت به مقاومت نمونه‌های مکعبی استاندارد

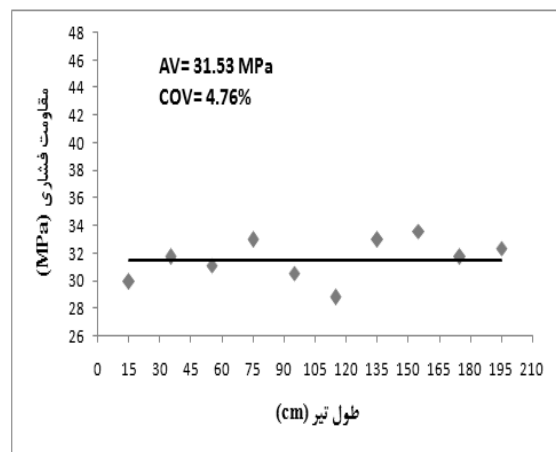
در جدول (۱۰) میانگین مقاومت‌های معادل مکعبی در هر تیر، بر اساس آزمایش های اولتراسونیک و مغزه‌گیری نسبت به مقادیر مقاومت نمونه‌های مکعبی نگهداری شده در شرایط مرطوب آورده شده است. مقاومت تخمین زده شده توسط آزمایش‌های مختلف، کمتر از مقاومت نمونه‌های استاندارد مکعبی نگهداری شده در شرایط مرطوب به دست آمد. میانگین مقاومت‌های معادل مکعبی در هر تیر، برای آزمایش اولتراسونیک و مغزه‌گیری به ترتیب بین ۸۵ و ۹۱ درصد و ۸۳ و ۹۰ درصد مقاومت نمونه‌های استاندارد نگهداری شده در شرایط مرطوب می‌باشند. در مطالعه انجام شده توسط Bungey و Madandoust [۱] بر روی المان تیر ساخته شده از بتن نرمال این مقدار ۷۲ درصد به دست آمده است. البته در مطالعه آن‌ها بر روی تیرهای ساخته شده از بتن های سبک این نسبت بیشتر بوده و به نتایج مشاهده شده در این تحقیق برای بتن‌های خودتراکم نزدیک‌تر می‌باشند. همچنین در بررسی‌های انجام شده توسط Zhu و همکاران [۴] بر روی ستون و تیر ساخته شده از بتن خودتراکم نسبت مذکور در همین محدوده به دست آمده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که حداقل نسبت مقاومت‌های درجا در تیرهای ساخته شده در این مطالعه به مقاومت نمونه‌های مکعبی استاندارد، بیشتر از حداقل مقدار توصیه شده در آیین‌نامه بتن ایران [۱۵] می‌باشد. بر اساس این نتایج پیشنهاد می‌شود که مقدار این ضریب با توجه به نوع بتن و عضو سازه‌ای مورد نظر، تعیین گردد.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، نسبت میانگین مقاومت‌های مکعبی معادل به مقاومت نمونه مکعبی استاندارد برای بتن‌های خود تراکم حاوی پرکننده پودر سنگ آهک بیشتر از بتن‌های خودتراکم حاوی پرکننده میکروسیلیس می‌باشد. این می‌تواند به دلیل حساسیت کمتر بتن خودتراکم حاوی پودر سنگ آهک نسبت به عمل آوری در شرایط خشک احتمالاً ناشی از حفظ آب بالای پودر سنگ آهک و تسریع بخشیدن به روند توسعه مقاومت توسط آن باشد که در مطالعات انجام شده توسط Zhu و همکاران [۴] نیز به آن اشاره شده است. همچنین نتایج نشان می‌دهند که این نسبت، با افزایش درصد ذرات PVC روند خاصی را طی نمی‌کند و نیز افزایش PVC تأثیر چندانی در افزایش یا کاهش این مقادیر نداشته است.

نتایج نشان می‌دهند که با افزایش در صد ذرات PVC در هر دو نوع پرکننده و هر دو نسبت آب به پودر، پراکندگی مقاومت افزایش می‌یابد، که این می‌تواند به دلیل کاهش همگنی بتن با افزایش ذرات PVC باشد. با تغییر نوع پرکننده از پودر سنگ آهک به میکروسیلیس و نیز افزایش نسبت آب به پودر، ضریب تغییرات اندکی بیشتر می‌شود که نشانه کاهش یکنواختی بتن می‌باشد. این می‌تواند به دلیل کاهش خواص خودتراکمی مخلوط باشد، البته در این زمینه نیاز به مطالعات بیشتری است. در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) تغییرات مقاومت بتن در تیرهای با کمترین و بیشترین تغییرات که به ترتیب مربوط به طرح‌های S0.47Sf-P10 و S0.39Lp-P0 می‌باشد، نشان داده شده است.



شکل ۱۱- تغییرات مقاومت فشاری بتن در طول تیر با طرح S0.39Lp-P0



شکل ۱۲- تغییرات مقاومت فشاری بتن در طول تیر با طرح S0.47Sf-P10

جدول ۱۰- مقایسه مقاومت بتن در نمونه‌های مکعبی استاندارد و مقاومت‌های معادل درجا در سن ۲۸ روز

f_c/f		مقاومت نمونه مکعبی در شرایط مرطوب (f) (MPa)	میانگین مقاومت‌های معادل مکعبی بر اساس آزمایش‌های زیر (f_c) (MPa)		طرح اختلاط
مغزه‌گیری	امواج فراصوتی		مغزه‌گیری	امواج فراصوتی	
۰/۸۴	۰/۸۶	۵۲/۷۱	۴۴/۰۸	۴۵/۵۸	S0.39Sf-P0
۰/۸۵	۰/۸۷	۴۷/۵۶	۴۰/۱۸	۴۱/۵۹	S0.39Sf-P5
۰/۸۴	۰/۸۷	۴۵/۱۲	۳۷/۷۴	۳۹/۰۴	S0.39Sf-P10
۰/۸۷	۰/۸۸	۴۴/۵۷	۳۸/۶۴	۳۹/۱۷	S0.39Lp-P0
۰/۹۰	۰/۸۸	۳۹/۴۱	۳۵/۳۴	۳۴/۵۶	S0.39Lp-P5
۰/۹۰	۰/۸۷	۳۷/۵۲	۳۲/۵۹	۳۲/۴۸	S0.39Lp-P10
۰/۸۳	۰/۸۸	۴۴/۹۲	۳۷/۲۸	۳۹/۶۵	S0.47Sf-P0
۰/۸۴	۰/۸۷	۴۰/۱۵	۳۲/۸۷	۳۵/۱۰	S0.47Sf-P5
۰/۸۴	۰/۸۵	۳۷/۴۰	۳۱/۲۴	۳۱/۸۷	S0.47Sf-P10
۰/۸۷	۰/۹۰	۳۷/۶۹	۳۲/۹۱	۳۳/۹۳	S0.47Lp-P0
۰/۸۸	۰/۹۱	۳۴/۲۱	۳۰/۱۵	۳۱/۲۵	S0.47Lp-P5
۰/۸۷	۰/۸۸	۳۲/۶۷	۲۸/۵۱	۲۸/۸۶	S0.47Lp-P10

۴- نتیجه‌گیری

نسبت متناظر ۰/۳۹ و نیز طرح‌های حاوی میکروسیلیس نسبت به پودر سنگ آهک مشهودتر می‌باشد.

۴- با ازدیاد نسبت آب به پودر از ۰/۳۹ به ۰/۴۷ تغییرات مقاومت بتن در ارتفاع تیر افزایش یافته و درصد کاهش مقاومت بیشتر شده است.

۵- تغییرات مقاومت بتن در ارتفاع تیر برای طرح‌های حاوی پرکننده پودر سنگ آهک کمتر از طرح‌های حاوی میکروسیلیس نظیر می‌باشد.

۶- مقایسه نتایج حاصل از دو آزمایش اولتراسونیک و مغزه-گیری نشان می‌دهد که روند تغییرات مقاومت بتن در ارتفاع تیرها با استفاده از هر دو آزمایش تقریباً مشابه می‌باشد.

۷- نسبت میانگین مقاومت‌های معادل مکعبی حاصل از آزمایش اولتراسونیک و مغزه‌گیری در هر تیر به مقاومت نمونه-های استاندارد نگهداری شده در شرایط مرطوب نشان می‌دهد که طرح‌های حاوی پودر سنگ آهک مقادیر بیشتری را نسبت به طرح‌های حاوی میکروسیلیس دارا می‌باشند. همچنین این نسبت با افزایش درصد ذرات PVC روند خاصی را طی نکرده و تغییر چندانی نداشته است.

۸- بر اساس نتایج پیشنهاد می‌شود که ضریب توصیه شده در آیین‌نامه بتن ایران (آبا)، به منظور کاهش مقاومت فشاری بتن، متناسب با عضو سازه‌ای و همچنین نوع بتن به کار رفته در سازه لحاظ گردد.

در این مطالعه آزمایشگاهی به ارزیابی مقاومت بتن‌های خودتراکم حاوی ذرات خرد شده لوله‌های PVC، در تیرهای با مقیاس واقعی با استفاده از آزمایش‌های غیر مخرب اولتراسونیک و نیمه مخرب مغزه‌گیری پرداخته شد و نتایج آن‌ها مقایسه گردید. تأثیر در صدهای مختلف این ذرات (۰، ۵، ۱۰) و نوع پرکننده‌های مصرفی (میکروسیلیس و پودر سنگ آهک) و نیز نسبت‌های آب به پودر به کار رفته (۰/۳۹ و ۰/۴۷) بر روی نتایج مورد توجه قرار گرفت. از بررسی‌های انجام شده در این مطالعه نتایج زیر قابل استنتاج است.

۱- در تمامی سنین مورد آزمایش، با افزایش درصد ذرات PVC، مقاومت فشاری، سرعت امواج اولتراسونیک کاهش پیدا کرده است.

۲- با افزایش درصد ذرات PVC برای هر دو نسبت آب به پودر و برای هر دو نوع پرکننده، مقاومت‌ها حاصله از هر دو آزمایش در همه ترازها کاهش می‌یابد. همچنین مقاومت‌های تیرهای ساخته شده از میکروسیلیس در تمامی ترازها بیشتر از پودر سنگ آهک بود.

۳- با افزایش درصد ذرات PVC، در هر دو نسبت آب به مواد پودری و در هر دو نوع پرکننده، درصد کاهش مقاومت از تراز تحتانی به سمت تراز فوقانی بیشتر شده است. میزان این افزایش برای طرح‌های با نسبت آب به پودر ۰/۴۷ در مقایسه با

- ۹- ضریب تغییرات مقاومت بتن نسبت به میانگین در طول تیرها بین ۱ الی ۵ درصد بود که نشان دهنده یکنواختی مناسب بتن‌های خود تراکم در طول تیر می‌باشد.
- ۱۰- با افزایش در صد ذرات PVC در هر دو نوع پرکننده و هر دو نسبت آب به پودر، پراکندگی مقاومت در طول تیر افزایش می‌یابد.
- ۱۱- با تغییر نوع پرکننده از پودر سنگ آهک به میکروسلیس و نیز افزایش نسبت آب به پودر، ضریب تغییرات اندکی بیشتر می‌شود که نشانه کاهش یکنواختی بتن می‌باشد.
- ۵- مراجع**
- [1] Bungey, J. H., Madandoust, R., "Strength Variations in Lightweight Concrete Beams", Cement and Concrete Composites, 1994, 16, 40-55.
- [2] Khayat, K. H., Mani, K., Trudel, A., "In Situ Mechanical Properties of Wall Element Cast Using Self Consolidating Concrete", ACI Mater Journal, 1997, 94 (6), 291-305.
- [3] Khayat, K. H., Trembly, S., Paultre, P., "Structural Respose of Self Consolidating Concrete Columns", First International RILEM Symp on SCC, 1999, 291-305.
- [4] Zhu, W., Gibbs, J. C., Bartos, P. J. M., "Uniformity of In Situ Properties of Self-Compacting Concrete in Full-Scale Structural Elements", Cement and Concrete Composites, 2001, 23, 57-64.
- [5] Kou, S. C., Lee, G., Poon, C. S., Lai, W. L., "Properties of Lightweight Aggregate Concrete Prepared with PVC Granules Derived From Scraped PVC Pipes", Waste Management, 2009, 29, 621-628.
- [۶] مدن دوست، ر.، حاجتی‌مدارایی، ع. ا.، کوهستانی، س.، "بررسی تأثیر ضایعات لوله‌های PVC بر خواص بتن خودتراکم تازه"، ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، اردیبهشت ۱۳۹۰.
- [۷] مدن دوست، ر.، حاجتی‌مدارایی، ع. ا.، کوهستانی، س.، "بررسی خواص بتن خودتراکم سخت شده حاوی ضایعات لوله‌های PVC به عنوان مصالح سنگی ریزدانه"، نهمین کنگره بین المللی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اردیبهشت ۱۳۹۱.
- [8] BS 882, "Specification for Aggregates from Natural Sources for Concrete", UK, 1983.
- [9] ASTM C1017, "Standard Specification for Chemical Admixtures for Use in Producing Flowing Concrete", American Society for Testing and Materials, US, 2007.
- [10] ASTM C494, "Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete", American Society for Testing and Materials, US, 2013.
- [11] EFNARC, "Specifacation and Guidelines for Self-Compacting Concrete", European Federation, 2002.
- [12] Turkel, S., Altuntas, Y., "The Effect of Limestone Powder, Fly Ash and Silica Fume on the Properties of Self-Compacting Repair Mortars" Sadhana, 2009, 34 (2), 331-343.
- [13] BS 1881 Part120, "Method for Determination of the Compressive Strength of Concrete Cores", British Standard Institution, London, 1983.
- [14] Concrete Society, "Concrete Core Testing for Strength", Technical Report No.11, London, 1987.
- [۱۵] سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، "آیین‌نامه بتن ایران (آبا)"، دفتر امور فنی و تدوین معیارها و کاهش خطرپذیری ناشی از زلزله، چاپ هفتم، ۱۳۸۳.

EXTENDED ABSTRACT

The In Situ Strength Assessment of Polymer Self Compacting Concrete in Rc Beams

Rahmat Madandoust ^{a*}, Asghar Vatani Oskouei ^b, Milad Rajabi Jourshari ^c

^a Faculty of Civil Engineering, University of Guilan, Guilan, Iran

^b Faculty of Civil Engineering, Shahid Rajaee Teacher training University, Tehran, Iran

^c Takestan Islamic Azad University, Takestan, Iran

Received: 23 August 2015; Accepted: 22 February 2016

Keywords:

Self-compacting concrete, PVC pipe wastes, In situ tests, Ultrasonic, Core test

1. Introduction

Wide attempts have been performed to quantitative and qualitative control on concrete strength in structures and different methods have been innovated to estimate the in situ concrete compressive strength. On the basis of these methods, it can be divided into two groups consisting non-destructive and semi-destructive methods. To provide a suitable compaction, decrease on segregation and bleeding and facilitating on placement of concrete especially in sections with massive reinforcement, self-compacting concrete has been developed. In the research by Zhu et al. [1] in 2001, self-compacting concrete strength along length of beams and height of columns was investigated using core, pull out and Schmitt hammer tests and the results on uniformity showed similar pattern on variations. Also the results indicated that concrete strength variations along height of columns and length of beams for self-compacting concrete are slightly lower than normal concrete.

One of the factors that has caused that the concrete has been known as a superior materials is the possibility of making concrete by using different materials such as wastes. Whereas, wastes of polymeric products will remain in environment, therefore one of the greatest environmental challenges is always reusing this mass wastes. The interesting properties of this waste material are such as low density, high elastic property and low hardness which have been considered by the researchers. One of the polymers is PVC (poly vinyl chloride). The first research about using the PVC wastes in concrete was performed by Kou et al. [2] in 2009. The positive aspect indicated that the concrete produced by PVC granules are lighter (low density), have more ductility, lower drying shrinkage. The negative aspect indicated that workability, tensile strength and compressive strength will decrease. The main purpose of the present study is to assess the strength variations of self-compacting concrete containing PVC pipes wastes in reinforced concrete beams made in full scale using ultrasonic pulse velocity and core tests.

2. Methodology

In this paper, large scales 2.1 m×0.5 m×0.35 m lengths of beams were cast to evaluate the variations of concrete strength. In concrete mixtures, two amounts of powder materials (including cement and silica fume or limestone powder) with two ratios of water to powder 0.39 and 0.47 were used. Silica fume and limestone powder (Lp) were separately used by 10% and 20% by weight of powder materials, respectively. Also in the mixes, PVC crushed granules with different percentages of 5 and 10% by volume were used as partial replacement of sand. A total of twelve SCC mixes including control concretes were designed and tests on the beams at 28 days were made using nondestructive ultrasonic pulse velocity measurements and partially destructive 75 mm diameter core tests.

* Corresponding Author

E-mail addresses: rmadandoust@guilan.ac.ir (Rahmat Madandoust), vatani@srttu.edu (Asghar Vatani Oskouei), milad.rajabi84@yahoo.com (Milad Rajabi Jourshari).

3. Results and discussion

3.1. Estimated in situ cube strength

The estimated in situ cube strength in beams was obtained by using ultrasonic and core tests. In ultrasonic method, calibration curve were used to obtain the relation between the compressive strength and ultrasonic pulse velocity. Estimated in situ cube strength in different points of beam was calculated using this calibration curve. For core test, estimated in situ cube strength was obtained based on the relation suggested by BS1881:part120 [3].

3.2. Variations of concrete strength across depth of beams

Variations of estimated in situ cube strength across the depth of the beams were shown in Fig. 1 based on ultrasonic and core test results. The results clearly illustrate a reduction of strength towards the tops of the beams. Similar observation has also been seen in study by Bungey and Madandoust [4] on the beams made with normal and lightweight concretes. By increasing the percentage of PVC granules, for both ratios of water to powder materials, and both fillers, the percentage of strength reduction have been shown to be more towards the tops of the beams. This growth may be due to increase in segregation and bleeding and decrease on flowabiliy. By increasing the ratio water to powder from 0.39 to 0.47, the variations of strength across the depth of beam will increase.

For mixtures with low water to powder materials ratio ($w/p=0.39$), due to having more cement and consequently more viscosity will prevent the ascent of lighter aggregates to the top level of beam and therefore they have more homogeneity. Variations on concrete strength for mixtures containing limestone powder was less than those containing silica fume. This less variations for mixtures containing limestone powder may be due to more fluency and consequently resulted to be more homogeneity.

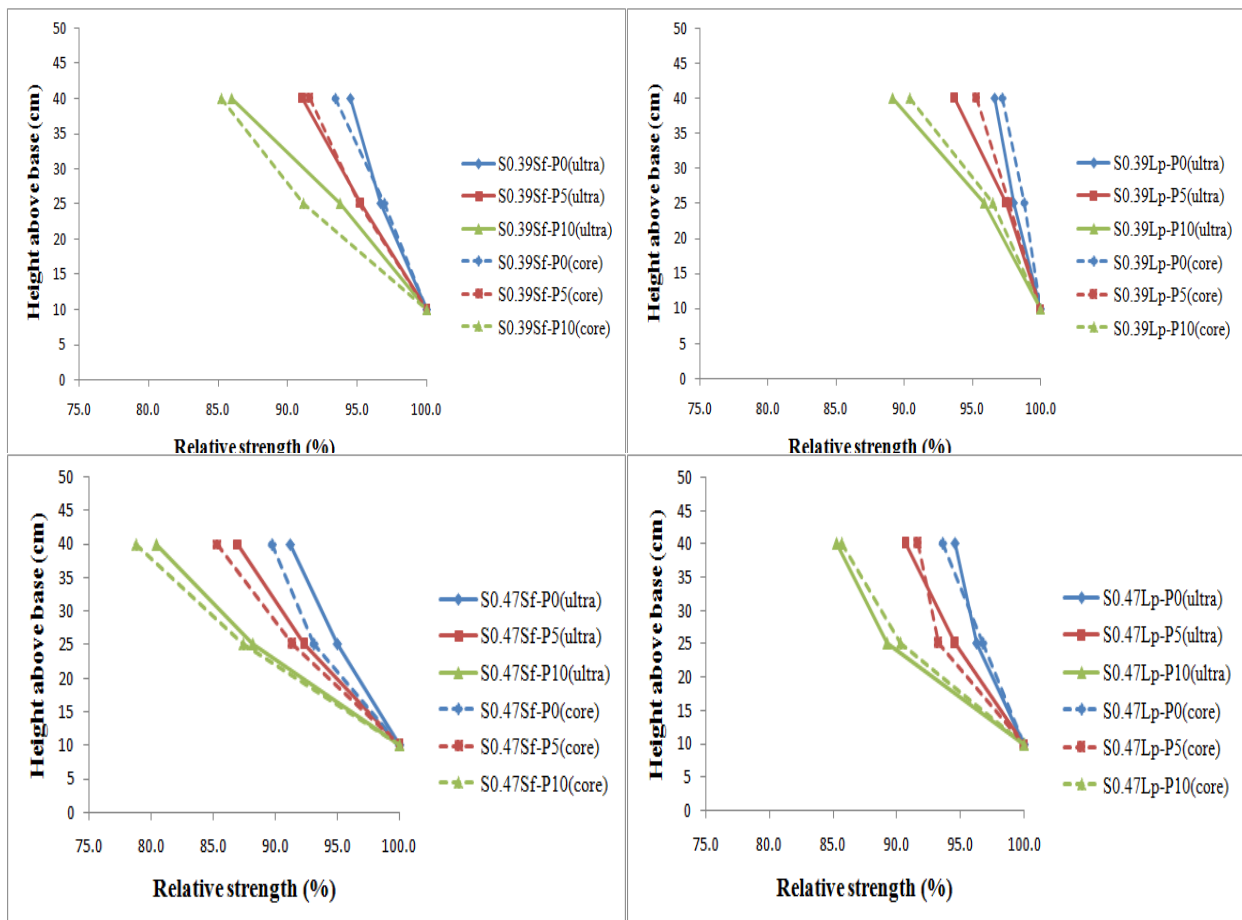


Fig.1. Variations of concrete strength across the depth of beams

Table 1. Comparison of cube strengths and estimated in situ cube strengths

Mixture design	Average of estimated in situ cube strength (f_e) (MPa)		28 day standard cube strength in wet curing condition (f) (MPa)	f_e/f	
	UPV	Coring		UPV	Coring
S0.39Sf-P0	45.58	44.08	52.71	0.86	0.84
S0.39Sf-P5	41.59	40.18	47.56	0.87	0.85
S0.39Sf-P10	39.04	37.74	45.12	0.87	0.84
S0.39Lp-P0	39.17	38.64	44.57	0.88	0.87
S0.39Lp-P5	34.56	35.34	39.41	0.88	0.90
S0.39Lp-P10	32.48	33.59	37.52	0.87	0.90
S0.47Sf-P0	39.65	37.28	44.92	0.88	0.83
S0.47Sf-P5	35.10	33.87	40.15	0.87	0.84
S0.47Sf-P10	31.87	31.24	37.40	0.85	0.84
S0.47Lp-P0	33.93	32.91	37.69	0.90	0.87
S0.47Lp-P5	31.25	30.15	34.21	0.91	0.88
S0.47Lp-P10	28.86	28.51	32.67	0.88	0.87

3.3. Comparison of cube strengths and estimated in-situ cube strengths

In Table 1, cube results have been compared with estimated in-situ values, from which it can be seen that relationships between in-situ and standard wet cured cube strengths differ between concretes. Estimated in situ cube strengths by different tests have been obtained to be less than those standard cube specimens in wet conditions. Average estimated in situ cube strength in each beam, based on ultrasonic and core tests was between 85 and 98%, and 83 and 90% of the standard cube strength in wet conditions respectively.

4. Conclusions

By increasing the percentage of PVC granules, for both water to powder materials ratio ($w/p=0.39$ and 0.47), and both fillers (silica fume and limestone powder), strength variations across depth of beam will increase. The mentioned increase is more sensible for $w/p=0.47$ in comparison to that of $w/p=0.39$ and also for concrete with silica fume in comparison to that of concrete with limestone powder. Comparison of the obtained results from ultrasonic and core tests indicate that the pattern of strength variations across depth of beams is almost similar. Ratio of average estimated in situ cube strength by ultrasonic and core tests in each beam to strength of standard cube specimens in wet conditions indicate that the mixtures containing limestone powder have been more in comparison to those containing silica fume. Also this ratio hasn't had any specific trend and hasn't changed much with increasing of PVC granules.

5. References

- [1] Zhu, W., Gibbs, J. C., Bartos, P. J. M., "Uniformity of In Situ Properties of Self-Compacting Concrete in Full-Scale Structural Elements", *Cement and Concrete Composites*, 2001, 23, 57-64.
- [2] Kou, S. C., Lee, G., Poon, C. S., Lai, W. L., "Properties of Lightweight Aggregate Concrete Prepared with PVC Granules Derived from Scraped PVC Pipes", *Waste Management*, 2009, 29, 621-628.
- [3] BS 1881 Part120, "Method for Determination of the Compressive Strength of Concrete Cores", British Standard Institution, London, 1983.
- [4] Bungey, J. H., Madandoust, R., "Strength Variations in Lightweight Concrete Beams", *Cement and Concrete Composites*, 1994, 16, 40-55.