

تحقیقات بتن

سال هجدهم، شماره سوم

پائیز ۱۴۰۴

ص ۳۷-۵۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۰۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۱۷

ارزیابی شاخص‌های مقاومتی بتن با تغییر در دانه بندی سنگ‌دانه آن، با تأکید بر روش‌های غیر مخرب

علی محمد رجبی *

گروه زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

سیدمحمدصادق قرشی

گروه مهندسی عمران، دانشگاه قم، قم، ایران.

چکیده

روش‌های مخرب یکی از معمول‌ترین روش‌ها جهت دستیابی به شاخص‌های مقاومتی بتن است. این روش‌ها علاوه بر تخریب بتن، هزینه‌های بالایی را نیز به همراه دارند. در چنین شرایطی کاربرد آزمایش‌های غیرمخرب (غیرمستقیم) می‌تواند راه حل بهتری باشد. در این مطالعه، آزمایش‌های مخرب مقاومت فشاری تک‌محوره، مقاومت کششی برزیلی، شاخص بار نقطه‌ای و نیز، آزمایش‌های غیرمخرب چکش اشمیت و سرعت پالس اولتراسونیک، روی سه نوع طرح اختلاط بتن که تفاوت آن‌ها، تنها تغییر در دانه‌بندی سنگ‌دانه آن‌ها بوده، انجام شده و نتایج با یکدیگر مقایسه شده‌اند. در ادامه روابط همبستگی بین نتایج حاصل از روش‌های مخرب و غیرمخرب ارائه شده است. نتایج نشان داد که تغییر دانه‌بندی سنگ‌دانه‌های بتن، تأثیر قابل توجهی روی مقادیر شاخص‌های مقاومتی بتن دارد. به گونه‌ای که استفاده بیش از حد از شن و به دنبال آن دانه‌بندی بسیار درشت در طرح اختلاط بتن، تأثیر منفی بر شاخص‌های مقاومتی بتن دارد.

واژه‌های کلیدی: مقاومت بتن، روش‌های مخرب، روش‌های غیرمخرب، دانه بندی، روابط همبستگی.

* نویسنده مسئول: amrajabi@ut.ac.ir

۱- مقدمه

رجبی و امیدی معاف [۵] با انجام آزمایش‌های مستقیم و غیرمستقیم مختلف روی نمونه‌هایی از بتن معمولی و بتن پیش‌آکنده، روابط متعددی را بین شاخصهای ژئومکانیکی خاک پیشنهاد کردند. تغییرات در میزان ذرات درشت دانه و مقاومت فشاری و کششی بتن هدف اصلی این تحقیق بوده است [۵].

یوسف و همکاران [۶] به پیش‌بینی مقاومت بتن با استفاده از آزمایش غیرمخرب در سازه‌های قدیمی پرداختند. سازه‌های ساخته شده در محدوده ۱۹۷۰ میلادی و تخریب شده که معمولاً فولاد این سازه‌ها دچار مشکل شده هدف اصلی این پژوهش بوده و ۳۶ نمونه با روش مخرب و هسته‌گیری و ۸۶ نمونه با تست صوت و ۲۳۴ نمونه نیز با چکش اشمیت مورد بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق اصلاحاتی در روابط موجود برای تبدیل شاخصهای غیر مخرب به مقاومت فشاری بتن انجام شده است.

مدن دوست و دیلمی [۷] با استفاده از روش اولتراسونیک، مقاومت فشاری بتن خود تراکم حاوی نانو ذرات را ارزیابی کردند. با نانو اکسید سیلیس، آلومینیوم و مس، ۱۳ طرح اختلاط متنوع بررسی شده و در زمان‌های عمل‌آوری ۳ تا ۹۰ روز تحت بارگذاری قرار گرفت. در نهایت، مقاومت نمونه‌ها بین ۲۰ تا ۵۴ مگاپاسکال برآورد شدند. اولوفیکو و همکاران [۸] با استفاده از تست غیر مخرب به تخمین مقاومت بتن تحت شرایط عمل‌آوری در آب و محیط اسیدی پرداختند. برای ارزیابی کیفیت بتن طبق پیش‌بینی صورت گرفته در محیط اسیدی بتن مقداری از مقاومت خود را از دست داده و خرابی تدریجی در نمونه موجود در اسید مشاهده گردید.

مبینی و خالو [۹] با استفاده از روش‌های غیر مخرب، به بررسی تأثیر نانو ذرات سیلیس پایروژنیک^۱ بر بتن مقاوم در برابر خوردگی پرداختند. تمرکز این تحقیق بر خوردگی میلگرد بتن بوده است. بهبود مقاومت فشاری و مقاومت الکتریکی که هدف اصلی این افزودنی بوده با روش‌های غیر مخرب تأیید گردید. ذرات درشت افزایش نسبی بیشتری در مقاومت فشاری داشته‌اند.

چوبی و همکاران [۱۰] سعی در کشف روابط بین آزمایش‌های مخرب و غیر مخرب بتن داشتند. تست چکش اشمیت و تست سرعت موج و مقاومت‌های معمول بتن هدف اصلی این تحقیق بوده است.

امروزه بتن یکی از متداول‌ترین مواد در صنعت ساختمان به شمار می‌رود. باوجود انجام مطالعات بسیاری که تاکنون بر روی بتن انجام شده است، اما وابسته بودن خواص بتن به شاخصهای گوناگونی نظیر مصالح تشکیل دهنده، روند تولید و فرآوری، نحوه اجرا و شرایط عمل‌آوری، بتن را به یک ماده غیرقابل پیش‌بینی و پیچیده مبدل ساخته است. توسعه راهکارهایی که بتواند اطمینان لازم از کیفیت و سلامت سازه‌های بتنی را به دست دهند، از اهمیت زیادی برخوردارند. بطور معمول امروزه به منظور تعیین شاخصهای ژئومکانیکی بتن غالباً از روش مستقیم (مخرب) استفاده می‌شود. آزمایش‌های مستقیم، مخرب بوده و بسیار پرهزینه و زمان‌بر و در برخی موارد غیرقابل انجام است. روش‌های دیگری با عنوان روش‌های غیرمستقیم (غیرمخرب) وجود دارند؛ که بدون ایجاد آسیب فیزیکی و شیمیایی در نمونه‌ها یا سازه بتنی می‌توان برخی از خواص الاستیک از جمله مقاومت فشاری و ضریب الاستیسیته بتن را تخمین زد [۱]. بررسی مطالعات انجام شده در سال‌های اخیر حاکی از استفاده گسترده از آزمون‌های غیرمخرب در تعیین و آشکارسازی ناهنجاری‌های بتن است [۲].

کوماوات و همکاران [۲] به بررسی امکان ایجاد روابط بین تست غیرمخرب بتن نظیر چکش اشمیت و شاخصهای مقاومتی پرداختند. در پژوهش آنها، منحنی رگرسیون در محدوده آزمایش انجام شده تقریباً منطبق بر نتایج آزمایشگاهی بوده است. روابطی نظیر کربناسیون، آتش، شرایط عمل‌آوری و اثر این شاخصها بر بتن نیز بررسی گردیده است. داده بسیار زیادی در این مطالعه حدوداً نتایج تحقیقات ۶۵ ساله دانشمندان، بررسی شده است.

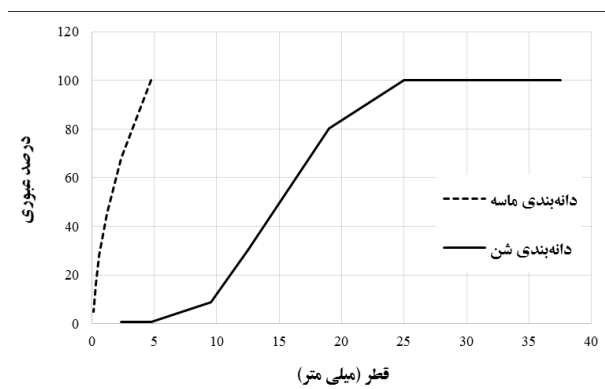
بروسوفسکی [۳] با انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری بتن و تعیین سختی بتن، روابطی میان مقاومت فشاری و عدد بازگشت چکش اشمیت توسعه داد. سلچوک و گوکچه [۴] ضمن انجام آزمایش‌های مختلف مقاومت فشاری و شاخص بار نقطه‌ای نمونه‌های مختلف بتن، روابطی میان مقاومت فشاری و شاخص نقطه‌ای تصحیح شده توسعه دادند و به این نتیجه رسیدند که با افزایش مقاومت فشاری بتن، نسبت شاخص بار نقطه‌ای تصحیح شده به مقاومت فشاری کاهش می‌یابد.

¹ Pyrogenic

بین شاخصهای حاصل از روش‌های مستقیم و روش‌های غیرمستقیم مورد جستجو قرار گرفته است. بر این اساس با توجه به داشتن نمونه‌های با طرح اختلاط مختلف می‌توان شاخصهای مقاومتی نمونه‌های بتن را با استفاده از این روابط تخمین زد.

۲- مواد و روش‌ها

در این پژوهش به منظور بررسی تأثیر میزان ذرات درشت‌دانه روی شاخصهای مقاومتی بتن، سه نوع طرح اختلاط بتن که از این به بعد به ترتیب CC1، CC2 و CC3 نامیده می‌شوند، ساخته شد. در مجموع برای انجام آزمایش‌های مختلف مورد نیاز در این پژوهش ۱۰۲ نمونه استوانه‌ای به قطر ۱۰۰ و ارتفاع ۲۰۰ mm، و مکعبی با اضلاع ۱۰۰ mm، ساخته شدند. در ساخت نمونه‌های بتن از سنگ‌دانه‌های شن (درشت‌دانه) و ماسه (ریزدانه)، سیمان و آب استفاده شده است. دانه بندی شن و ماسه مورد استفاده در هر سه نوع نمونه بتن (CC1، CC2 و CC3) یکسان بوده و در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- منحنی دانه بندی ذرات شن و ماسه

جدول ۱ شاخصهای منحنی دانه بندی شن و ماسه، شامل ضریب یکنواختی (C_u)، ضریب انحنا (C_c) و اندازه دانه‌ها (D) با شاخص‌های ۱۰، ۳۰، ۵۰ و ۶۰ که به ترتیب نشان می‌دهند که ۱۰، ۳۰، ۵۰ و ۶۰ درصد دانه‌ها از آن کوچکترند. مدول نرمی ماسه مصرفی در ساخت بتن ۳/۴۲ می‌باشد.

برای ساخت نمونه‌ها از آب شرب و سیمان پرتلند II دلجان استفاده شده است. همانطور که پیش‌تر گفته شد، در این پژوهش نمونه‌های بتنی در سه نوع درصد اختلاط مختلف ساخته شده‌اند.

در این پژوهش معلوم شد با گذشت سن بتن اعتبار روابط به دست آمده افزایش می‌یابد. عوامل مؤثر در تخمین روابط، نسبت آب به سیمان و نحوه عمل‌آوری بتن و سن بتن بوده است.

هاشم المترنه و دحیم [۱۱] به بررسی قدرت پیش‌بینی مقاومت بتن توسط روش‌های غیرمخرب پرداختند. در پژوهش آن‌ها، استفاده از روش دی‌الکتریک و چکش اشमित و سرعت فراصوت برای تخمین مقاومت انتخاب شد. یک رابطه لگاریتمی توسط این محققان ارائه و توسط نتایج مخرب آزمایشگاهی نیز تأیید شد. در سنین پایین به دلیل نرمی بتن آزمایش چکش اشमित نتایج مناسبی نداشته و شرایط عمل‌آوری بتن در تطابق نتایج بسیار مؤثر بوده است.

عبدالرازق و جمال [۱۲] ارزیابی نتایج چکش اشमित و امکان ارتباط این شاخص با مقاومت فشاری بتن را بررسی کردند. هدف این مطالعه ترکیب نتایج چکش اشमित و آزمون فشرده‌سازی بوده که از درجه ۲۰۰ تا ۸۰۰ در این تحقیق بررسی و روابطی برای ارتباط با مقاومت فشاری ارائه شده است. نتایج مقایسه آماری داده‌های آزمایشگاهی و پیش‌بینی شده با ضریب تعیین^۱ $R^2=0.97$ مورد تأیید قرار گرفته است.

کوامات و چندک [۱۳] با استفاده از تجزیه و تحلیل آماری نتایج تست چکش اشमित و بررسی ۵۳۴ نمونه آزمایشگاهی سعی بر کشف روابط بین شاخصهایی نظیر آزمون سختی داشتند. در این تحقیق از ضریب تغییرات به جای انحراف استاندارد استفاده شده است. در این تحقیق از استانداردهای مختلف برای طراحی آزمایش بهره گرفته شده که تفاوت نتایج در هر روش علاوه بر طرح اختلاط هر نمونه جالب توجه بوده است. در نهایت نیز اصلاحاتی برای روابط موجود برای ارتباط بین نتایج تست چکش اشमित و سایر شاخصهای مقاومتی ارائه شده است.

در پژوهش حاضر، نمونه‌هایی از بتن با اندازه سنگ‌دانه متنوع ساخته شده و آزمایش‌های ۲۸ روزه مقاومت فشاری تک محوره، مقاومت کششی برزیلی و شاخص بار نقطه‌ای (به عنوان آزمایش‌های مخرب؛ روش‌های مستقیم) و چکش اشमित و سرعت صوت (به عنوان آزمایش‌های غیرمخرب؛ روش‌های غیرمستقیم) روی این نمونه‌ها انجام شده است. سپس روابط تجربی

¹ Determination of Coefficient

برای هر طرح اختلاط انجام شده است. مقدار اسلامپ اندازه گیری شده برای هر مخلوط بتنی بین ۰/۹ الی ۱/۸ متغیر بوده است. سپس بتن آماده شده در طی سه مرحله درون قالب ریخته شد. در هر مرحله پس از ریختن مقداری بتن درون قالب عملیات تراکم توسط ۲۵ ضربه کوبه انجام گرفت و پس از آن توسط چکش لاستیکی نیز چند ضربه به بدنه قالب زده شد.

شکل ۲ نمایی از قالب های نمونه گیری، تهیه و آماده سازی نمونه های بتن را نشان می دهد. جدول ۲ نسبت های اختلاط مصالح را به ازای یک مترمکعب بتن نشان می دهد. با توجه به میزان یکسان نسبت آب به سیمان و سیمان در همه انواع بتن، میزان آب مصرفی به میزان ۱۹۸/۷۵ کیلوگرم محاسبه شده است. اما تغییر در میزان آب در هر یک از انواع بتن، به دلیل بیشتر بودن درصد رطوبت مصالح شنی و ماسه ای نسبت به حالت اشباع با سطح خشک (SSD)^۱ و نیز تغییر درمیزان مصالح در هر یک از طرح های اختلاط است.

در ساخت نمونه های بتن CC1، CC2 و CC3 نسبت همه مصالح در ملات بتن، شامل نسبت آب به سیمان و مقدار سیمان، یکسان بوده و تنها میزان مصالح شن و ماسه در آن ها متفاوت است. در ساخت نمونه ها از نسبت های معمول اختلاط در ساخت بتن با عیار سیمان ۳۷۵ کیلوگرم در متر مکعب استفاده شده است.

جدول ۱- شاخصهای منحنی دانه بندی شن و ماسه نمونه های بتن

مشخصه	Cc	Cu	D60	D50	D30	D10
شن	۰/۹۷	۱/۶۸	۱۶/۴	۱۵	۱۲/۵	۹/۷۵
ماسه	۱/۸۵	۱۷/۷۲	۱/۹۵	۱/۴	۰/۶۳	۰/۱۱

پس از تعیین نسبت های اختلاط در هر یک از نمونه های بتن، همه مصالح در مخلوط کن با یکدیگر مخلوط شده و از بتن تازه برای تهیه نمونه ها استفاده شده است. قبل از انتقال بتن به درون قالب های نمونه گیر، مقداری از آن جهت آزمایش اسلامپ تفکیک شد. آزمایش اسلامپ مطابق ASTM C143/C143M-20 [۱۴]،



شکل ۲- نمایی از فرایند تهیه و آماده سازی نمونه ها به منظور انجام آزمایش های مورد نظر

جدول ۲- نسبت های اختلاط مصالح به ازای یک مترمکعب بتن برای نمونه های مختلف

نوع بتن	نسبت آب به سیمان	مقدار شن (kg)	مقدار سیمان (kg)	مقدار ماسه (kg)	مقدار آب (kg)
CC1	۰/۵۳	۷۴۶، ۲۷/۶٪	۳۷۵	۱۰۹۳	۱۳۲
CC2	۰/۵۳	۵۳۲، ۱۹/۷٪	۳۷۵	۱۳۲۸	۱۰۷
CC3	۰/۵۳	۱۲۵۱، ۴۶/۳٪	۳۷۵	۵۷۴	۱۵۷

انجام شده است. مشخصات آزمایش های انجام شده روی انواع نمونه ها در جدول ۳ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که، کلیه آزمایش های انجام شده در پژوهش بر روی نمونه های با سن عمل آوری ۲۸ روزه انجام شده است.

در این پژوهش، جهت بررسی تأثیر سنگ دانه های شن و ماسه (دانه بندی) بر روی شاخصهای مقاومتی بتن، آزمایش های مقاومت فشاری تک محوره، چکش اشमित، شاخص بار نقطه ای، سرعت صوت و مقاومت کششی برزیلی بر روی نمونه های ساخته شده،

¹ saturated-surface dry

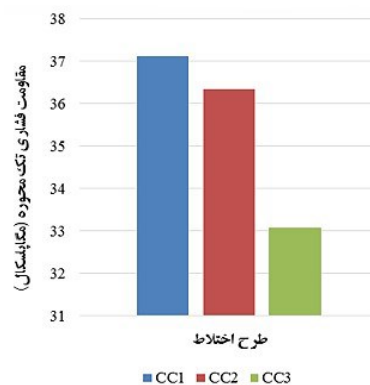
جدول ۳- کلیات مشخصات آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش

آزمایش	استاندارد	تعداد	شکل هندسی	بعد نمونه
فشار تک‌محوری	ASTM C39 [۱۵]	۳۰	مکعبی	۱۰۰ mm
کشش برزیلی	ASTM C496 [۱۶]	۳۰	استوانه	۱۰۰×۲۰۰ mm
بار نقطه‌ای	ASTM C293 [۱۷]	۳۰	مکعب	۱۰۰ mm
چکش اشمیت	ASTM C805 [۱۸]	۹	دال بتنی	۱×۱ m
سرعت موج	ASTM C597 [۱۹]	۹	مکعب	۱۵۰ mm

۳- نتایج و بحث

۳-۱- آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوره

در شکل ۳ دستگاه آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوره و مقادیر میانگین مقاومت فشاری تک‌محوره برای هر سه نوع بتن نشان داده شده‌اند. لازم به ذکر است که برای هر نوع بتن، ۱۰ نمونه ساخته شده، و میانگین مقاومت فشاری تک‌محوری آنها بر حسب مگاپاسکال (MPa) به عنوان نتیجه در شکل ۳ آورده شده است.

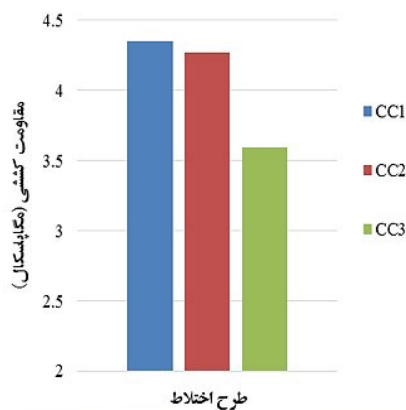


شکل ۳- بالا: مقایسه میانگین مقاومت فشاری تک‌محوره نمونه‌ها در سه طرح اختلاط مختلف؛ پایین: دستگاه آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوره بر روی نمونه مکعبی

حد در بتن CC3 موجب عدم چسبندگی مناسب ملات با ذرات درشت‌دانه شن شده که در نتیجه مقاومت فشاری پایین‌تری را نسبت به نمونه‌های دیگر به دنبال دارد.

۳-۲- آزمایش مقاومت کششی برزیلی

آزمایش مقاومت کششی برزیلی بر روی ۱۰ نمونه از هر نوع بتن انجام شد و میانگین مقادیر مقاومت کششی نمونه‌ها محاسبه شده و در شکل ۴ آمده است. مطابق با شکل ۴، مقاومت کششی بتن CC1 همانند مقاومت فشاری آن، نسبت سایر انواع بتن بیشتر است.

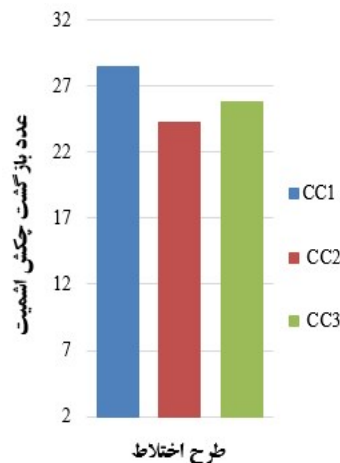


شکل ۴- بالا: مقایسه میانگین مقادیر مقاومت کششی نمونه‌ها در سه طرح اختلاط مختلف؛ پایین: آزمایش برزیلی بر روی نمونه‌های استوانه‌ای استاندارد

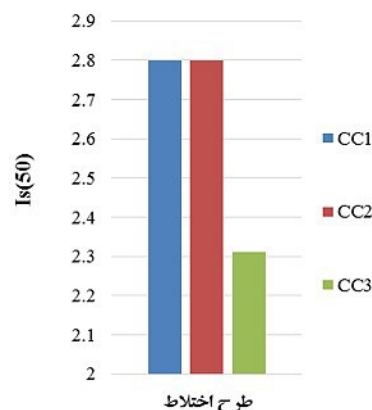
همانطور که در شکل مشخص است، بتن CC1 دارای مقاومت فشاری بیشتری نسبت به انواع دیگر است. وجود ذرات شن بیش از

۳-۳- آزمایش بار نقطه ای

در این پژوهش، آزمایش تعیین شاخص بار نقطه‌ای بر روی ۱۰ نمونه از هر نوع بتن انجام شد و شاخص بار نقطه‌ای تصحیح شده (Is(50)) نمونه‌ها که معادل بار نقطه‌ای به دست آمده از نمونه‌ای به قطر ۵۰ میلی‌متر است، محاسبه گردید. در شکل ۵ دستگاه مورد استفاده در این آزمایش و میانگین مقادیر شاخص بار نقطه‌ای نمونه‌ها را برای درصد‌های مختلف اختلاط نشان داده شده است. مطابق شکل، شاخص بار نقطه‌ای بتن‌های CC1 و CC2 با هم برابر بوده و حدوداً ۱/۲ برابر شاخص بار نقطه‌ای CC3 می‌باشند.



شکل ۶- بالا: میانگین عدد بازگشت چکش اشمیت نمونه‌ها برای طرح‌های مختلف اختلاط؛ پایین: آزمایش چکش اشمیت بر روی دال‌های مکعبی



شکل ۵- بالا: مقایسه میانگین مقادیر شاخص بار نقطه ای نمونه‌ها برای طرح‌های مختلف اختلاط؛ پایین: دستگاه آزمایش شاخص بار نقطه ای بر روی آزمونه‌های مکعبی

۳-۵- آزمایش سرعت پالس اولتراسونیک (UPV^۲)

سرعت موج بر روی سه نمونه مکعبی $150 \times 150 \times 150 \text{ mm}^3$ از هر نوع بتن با استفاده از دستگاه اولتراسونیک انجام شد و مقادیر سرعت موج آزمونه‌ها محاسبه گردیدند. شکل ۷ دستگاه مورد استفاده در این آزمایش و مقادیر میانگین سرعت موج را برای نمونه‌های با درصد اختلاط مختلف نشان می‌دهد.

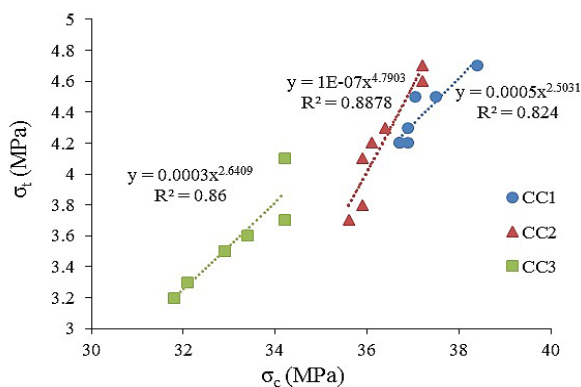
۳-۴- آزمایش چکش اشمیت^۱

آزمایش مقاومت فشاری به روش چکش اشمیت بر روی سه دال بتنی مکعبی $1 \times 1 \text{ m}^2$ از هر یک از انواع بتن انجام شد و مقادیر عدد بازگشت چکش اشمیت نظیر آن محاسبه گردید. شکل ۶

² Ultrasonic Puls Velocity

¹ Schmidt

فشاری (شکل ۸)، روابط همبستگی (۱) تا (۳) به ترتیب، برای نمونه‌های CC1، CC2 و CC3 به دست آمده‌اند. همانطور که در شکل ۸ مشخص است، مناسب‌ترین روابط همبستگی برای هر سه نوع بتن که بیشترین میزان ضریب تعیین (R^2) را دارند، روابط توانی می‌باشند. ضریب تعیین بالا، کیفیت و دقت مناسبی را جهت ارائه روابط همبستگی ارائه داده است. مطابق با شکل ۸، بتن CC3 به دلیل مقادیر بیش از حد سنگ‌دانه درشت (شن) و عدم اتصال بین ذرات سنگ‌دانه و ملات بتن نسبت مقاومت فشاری به کششی کمتری در مقایسه با CC1 و CC2 دارد. حبیبی و همکاران [۲۱] نیز در پژوهش خود از پوک‌ه معدنی هم اندازه شن به عنوان سنگ‌دانه درشت استفاده کردند و نشان دادند که در نمونه‌های با درصد حجمی بالای پوک‌ه (نسبت حجمی پوک‌ه به کل سنگ‌دانه بیشتر ۷۰٪)، نسبت مقاومت فشاری به کششی کاهش یافته است.



شکل ۸- رابطه مقاومت کششی و مقاومت فشاری آزمون‌ها

$$\sigma_t = 5E-04\sigma_c^{2.5031} \quad (R^2=0.824) \quad (1)$$

$$\sigma_t = 1E-07\sigma_c^{4.7903} \quad (R^2=0.8878) \quad (2)$$

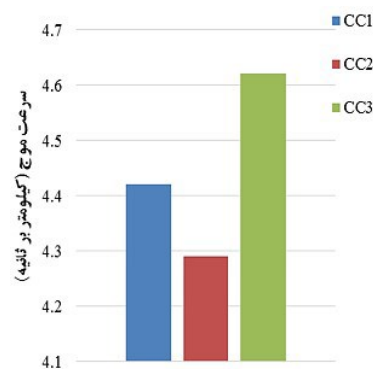
$$\sigma_t = 3E-04\sigma_c^{2.6409} \quad (R^2=0.86) \quad (3)$$

در این روابط σ_c و σ_t به ترتیب مقاومت کششی و مقاومت فشاری بتن بر حسب مگاپاسکال می‌باشند.

۳-۷- رابطه مقاومت فشاری و شاخص بار نقطه‌ای تصحیح شده

با انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری تک محوره و بار نقطه‌ای و رسم رابطه بین آن‌ها (شکل ۹)، روابط همبستگی خطی (۴) الی (۶) بین مقاومت فشاری و شاخص بار نقطه‌ای تصحیح شده به ترتیب برای درصد‌های اختلاط نمونه‌های CC1، CC2 و CC3 به دست آمد. مطابق با شکل ۹، با افزایش شاخص بار نقطه‌ای، مقاومت

با توجه به شکل ۷، بتن CC3 نسبت به سایر بتن‌ها در این ویژگی، برتری دارد. علت بالاتر بودن مقدار عددی سرعت موج در این بتن را می‌توان به بیشتر بودن میزان ذرات شن نسبت به سایر انواع بتن نسبت داد. به همین دلیل، بتن CC1 نیز نسبت به بتن CC2 سرعت موج بیشتری را نشان داده است. از طرفی وجود بیش از حد مقدار شن سبب ایجاد یک اختلاط ناهمگن و نیز عدم چسبندگی مناسب ملات با ذرات درشت‌دانه شن می‌شود. از طرفی وجود بیش از حد مقدار شن سبب اختلاطی ناهمگن و عدم چسبندگی مناسب ملات با ذرات درشت‌دانه شن می‌شود. این موضوع بر خلاف آزمایش UPV بر نتایج سایر آزمون‌ها تأثیر منفی گذاشته است. در همین رابطه بوگاس و همکاران [۲۰] مشاهده کردند که در برخی موارد، با وجود سرعت موج بیشتر، مقادیر مقاومت فشاری کاهش یافته است.



شکل ۷-بالا: نمودار مقایسه میانگین مقادیر سرعت موج (کیلومتر بر ثانیه) نمونه‌ها برای طرح‌های مختلف اختلاط؛ پایین: دستگاه آزمایش سرعت موج بر روی آزمون‌های مکعبی

۳-۶- رابطه مقاومت فشاری و مقاومت کششی

بر اساس نتایج بدست آمده از آزمایش‌های مقاومت فشاری تک محوری و کششی و رسم منحنی مقاومت کششی نسبت به مقاومت

$$\sigma_c = 0.1041R_n + 34.19 \quad (R^2=0.915) \quad (7)$$

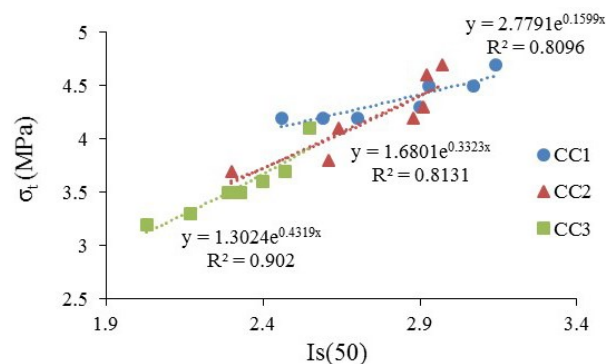
$$\sigma_c = 0.213R_n + 31.248 \quad (R^2=0.7668) \quad (8)$$

$$\sigma_c = 0.2815R_n + 25.95 \quad (R^2=0.9532) \quad (9)$$

که در این روابط، σ_c مقاومت فشاری و R_n عدد بازگشت چکش اشمیت نمونه‌ها را نشان می‌دهند.

۹-۳- رابطه مقاومت کششی و شاخص بار نقطه‌ای تصحیح شده

با انجام آزمایش‌های بار نقطه‌ای و مقاومت کششی برزیلی رابطه بین σ_t و $Is(50)$ به دست آمد. شکل ۱۱ رابطه بین σ_t و $Is(50)$ را نشان می‌دهد. مطابق شکل ۱۱، بهترین روابط همبستگی بین مقاومت کششی و شاخص بار نقطه‌ای تصحیح شده نمونه‌های CC1، CC2 و CC3 به شکل نمایی و به ترتیب مطابق روابط (۱۰) الی (۱۲) به دست آمده‌اند.



شکل ۱۱- رابطه مقاومت کششی و شاخص بار نقطه‌ای تصحیح شده

$$\sigma_t = 2.7791 \exp(0.1599 \times Is(50)) \quad (R^2=0.8096) \quad (10)$$

$$\sigma_t = 1.6801 \exp(0.3323 \times Is(50)) \quad (R^2=0.8131) \quad (11)$$

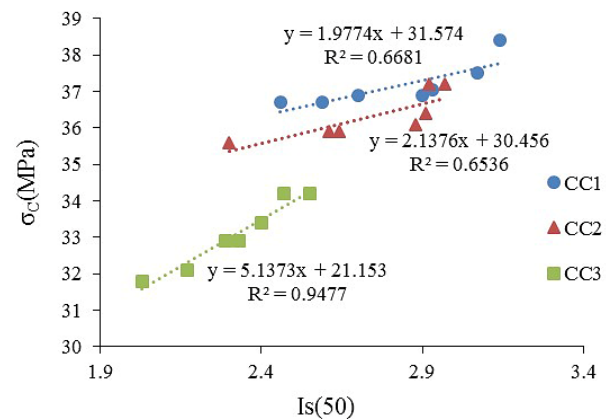
$$\sigma_t = 1.3024 \exp(0.4319 \times Is(50)) \quad (R^2=0.902) \quad (12)$$

که در این روابط، $Is(50)$ شاخص بار نقطه‌ای تصحیح شده و σ_t مقاومت کششی نمونه‌ها را نشان می‌دهند.

۱۰-۳- رابطه مقاومت کششی و عدد بازگشت چکش اشمیت

با انجام آزمایش‌های چکش اشمیت و مقاومت کششی برزیلی و رسم رابطه بین آن‌ها (R_n و σ_t)؛ (شکل ۱۲)، روابط همبستگی نمایی (۱۳) الی (۱۵) بین R_n و σ_t به ترتیب برای نمونه‌های CC1، CC2 و CC3 به دست آمد.

فشاری نیز افزایش پیدا می‌کند. این نتایج با پژوهش زا کوئب و ایشی‌باشی [۲۲] و سلچوک و گوکچه [۴] مشابه است.



شکل ۹- رابطه مقاومت شاخص بار نقطه‌ای و مقاومت فشاری آزمونه‌ها

$$\sigma_c = 1.9774Is(50) + 31.574 \quad (R^2=0.6681) \quad (4)$$

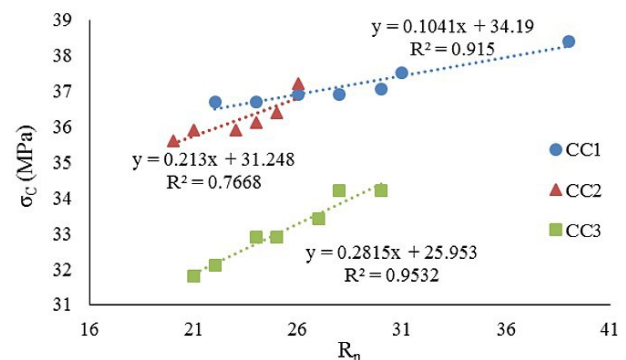
$$\sigma_c = 2.1376Is(50) + 30.456 \quad (R^2=0.6536) \quad (5)$$

$$\sigma_c = 5.1373Is(50) + 21.153 \quad (R^2=0.9477) \quad (6)$$

که در این روابط، $Is(50)$ شاخص بار نقطه‌ای تصحیح شده و σ_c مقاومت فشاری تک محوره نمونه است.

۸-۳- رابطه مقاومت فشاری و عدد بازگشت چکش اشمیت

با انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری تک محوره و چکش اشمیت، مطابق شکل ۱۰، روابط همبستگی خطی (۷) الی (۹) بین مقاومت فشاری تک محوره و عدد بازگشت چکش اشمیت به ترتیب برای نمونه‌های CC1، CC2 و CC3 به دست آمد. ذوالقدری و همکاران [۲۳] نیز روابطی بین نتایج چکش اشمیت و مقاومت فشاری بتن ارائه داده‌اند.



شکل ۱۰- رابطه مقاومت فشاری و عدد بازگشت چکش اشمیت

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، نمونه‌هایی از بتن که صرفاً با تمایز در دانه‌بندی آن‌ها با نام‌های بتن CC1، CC2 و CC3 تهیه شده‌اند، در زمان عمل‌آوری ۲۸ روزه، تحت آزمایش‌های مقاومت فشاری تک‌محوره، مقاومت کششی برزیلی و شاخص بار نقطه‌ای (به عنوان آزمایش‌های مخرب) و چکش اشमित و سرعت صوت (به عنوان آزمایش‌های غیرمخرب) قرار گرفته‌اند. سپس روابط همبستگی بین شاخص‌های حاصل از روش‌های مستقیم و روش‌های غیر مستقیم مورد جستجو قرار گرفت.

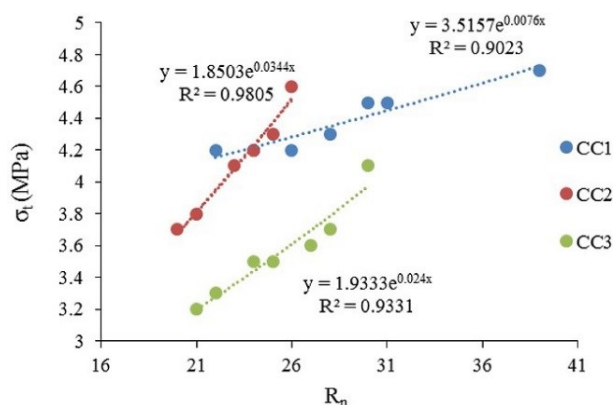
نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوره نشان داد، بتن CC1 نسبت به CC2 و CC2 نسبت به CC3 مقاومت فشاری بیشتری دارد. مقادیر بیش از حد شن و به تبع آن دانه بندی بیش از حد درشت، سبب کاهش چسبندگی مناسب ملات با شن و به دنبال آن وقوع گسیختگی از مرزهای ملات و سنگ‌دانه‌های شنی خواهد شد.

نتایج آزمایش مقاومت کششی برزیلی نشان داد که بتن CC1 دارای مقاومت کششی بیشتری نسبت به بتن CC2 و CC3 می‌باشد. همچنین شاخص بار نقطه‌ای تصحیح شده برای بتن CC1 دارای مقاومت بیشتری نسبت به بتن CC2 و CC3 می‌باشد. بتن CC1 از مقادیر عدد بازگشت چکش اشमित بالاتری، نسبت به بتن CC2 و CC3 برخوردار می‌باشد. مقدار عدد بازگشت چکش اشमित برای CC3 بیشتر از CC2 بوده که دلیل آن را می‌توان به وجود بیش از حد ذرات درشت‌دانه شن و تأثیر آن بر نتایج آزمایش نسبت داد.

نتایج سرعت موج التراسونیک نیز نشان داد که بتن CC3 ساخته شده با دانه‌بندی درشت‌تر، سرعت موج بیشتری نسبت به بتن CC2 و CC1 دارد. نتایج این آزمون نسبت مستقیم با میزان شن موجود در بتن داشته، به طوری که هرچه میزان شن موجود در بتن بیشتر، مقدار سرعت موج بیشتر بوده است. بر همین اساس بتن CC1 به دلیل مقدار شن بیشتر نسبت به CC2 مقدار سرعت موج بیشتر داشته است.

در نهایت با توجه به نتایج بهتر آزمایش‌های انجام شده روی بتن CC1، می‌توان دانه‌بندی این نوع بتن را به عنوان دانه‌بندی بهینه در طرح اختلاط بتن، معرفی کرد.

لازم به ذکر است که، گرچه روابط همبستگی ارائه شده در این



شکل ۱۲- رابطه عدد بازگشت چکش اشमित و مقاومت کششی

$$\sigma_t = 3.5157 \exp(0.0076 \times R_n) \quad (R^2=0.9023) \quad (13)$$

$$\sigma_t = 1.8503 \exp(0.0344 \times R_n) \quad (R^2=0.9805) \quad (14)$$

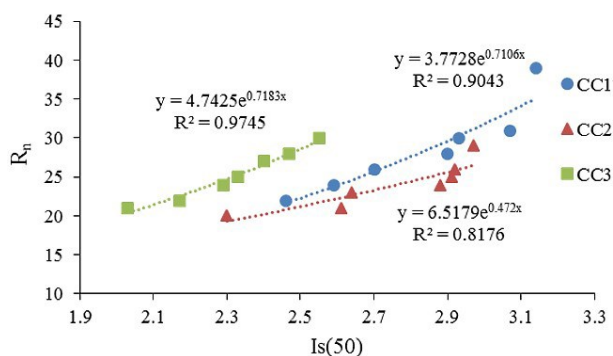
$$\sigma_t = 1.9333 \exp(0.024 \times R_n) \quad (R^2=0.9331) \quad (15)$$

که در این روابط، σ_t مقاومت کششی و R_n عدد بازگشت چکش اشमित نمونه‌ها را نشان می‌دهند.

۳-۱۱- رابطه عدد بازگشت چکش اشमित و شاخص بار

نقطه‌ای تصحیح شده

با انجام آزمایش‌های بار نقطه‌ای و چکش اشमित رابطه بین $Is(50)$ و R_n مطابق با شکل ۱۳ روابط همبستگی نمایی (۱۶) الی (۱۸) به ترتیب برای نمونه بتن‌های CC1، CC2 و CC3 به دست آمد.



شکل ۱۳- رابطه شاخص بار نقطه‌ای اصلاح شده و عدد بازگشت

چکش اشमित

$$R_n = 3.7728 \exp(0.7106 Is(50)) \quad (R^2=0.9043) \quad (16)$$

$$R_n = 6.5179 \exp(0.472 Is(50)) \quad (R^2=0.8176) \quad (17)$$

$$R_n = 4.7425 \exp(0.7183 Is(50)) \quad (R^2=0.9745) \quad (18)$$

که در این روابط، $Is(50)$ شاخص بار نقطه‌ای و R_n عدد بازگشت چکش اشमित نمونه‌ها را نشان می‌دهند.

KSCE Journal of Civil Engineering, 19(6): 1767-1774, 2015.

[۵] رجیبی، ع. م.، امیددی معاف، ف. "تأثیر دانه بندی ذرات شن بر روی شاخصهای مقاومتی بتن پیش آکنده و مقایسه آن با بتن معمولی"، نهمین کنفرانس ملی بتن، قرچک، ۱۳۹۶.

[6] Youcef, B., Said, K., Khoudja, A.B. "Prediction of Concrete Strength by Non-Destructive Testing in Old Structures: Effect of Core Number on the Reliability of Prediction" in: MATEC Web of Conferences, 149, 02007, 2018.

[۷] مدندوست، ر.، دیلمی پشتجوئی، ص. "ارزیابی مقاومت فشاری بتن خود تراکم حاوی نانو مواد با استفاده از روش اولتراسونیک" نشریه مهندسی سازه و ساخت، ۷(۳): ۷۲-۵۵، ۱۳۹۹.

[8] Olowofoyeku, A., Ofuyatan, O., Oluwafemi, J. "Non-Destructive Testing on Concrete Subjected to Chemical Condition" in: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 1107(1): 012043, 2021.

[۹] مبینی، م.، خالو، ع. "بررسی تأثیر کاربرد نانوذرات سیلیس پایروژنیک بر مقاومت بتن توانمند در برابر خوردگی میلگردهای مدفون در بتن" مهندسی عمران، ۳۶۲(۴۲): ۹۰-۸۱، ۱۳۹۹.

[10] Choubey, S., Singh, S., Mishra, R., Yadav, P., Gupta, S. "Developing Empirical Relationship between Destructive and Non-Destructive testing of Concrete", International Journal of Frontier in Civil and Structural Engineering, 2(2), 2020.

[11] Al-Mattarneh, H., Dahim, M. "Comparison of Nondestructive Testing Method for Strength Prediction of Asphalt Concrete Material" Civil Engineering Journal, 7(1): 165-178, 2021.

[12] Abd Elrazek, M., Gamal, Y.A.S. "The Reliable Concrete Compression Strength Assessment by Schmidt Hammer for Different Concrete Grades" in: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 1171(1): 012004, 2021.

[13] Kumavat, H.R., Chandak, N.R. "Repeatability of Concrete Rebound Hardness Using Comprehensive Statistical Analysis" Journal of King Saud University-Engineering Sciences, 35(3):167-173, 2023.

[14] ASTM C143/C143M-20, Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020.

[15] ASTM C39/C39M-24, Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, ASTM International, West

مطالعه با در نظر گرفتن سه طرح اختلاط به کار گرفته شده در این پژوهش می‌باشد، اما برای نمونه‌های بتن با طرح اختلاط مختلف با در نظر گرفتن دانه بندی‌های مختلف، با رعایت احتیاط لازم قابل استفاده می‌باشند.

با توجه به هزینه بالا و زمان بردن روش‌های مستقیم تعیین مقاومت بتن و مخرب بودن این نوع روش‌ها، توسعه و اعتبارسنجی روابط قابل اتکا میان آزمون‌های مخرب و غیرمخرب، گامی مؤثر در جهت کاهش وابستگی به آزمون‌های مخرب در پروژه‌های واقعی به شمار می‌رود و می‌تواند فرایند ارزیابی کیفیت و دوام سازه‌های بتنی را تسهیل کند. از سوی دیگر، نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که بدون تغییر در مقدار سیمان یا نسبت آب به سیمان، صرفاً با اصلاح دانه‌بندی سنگ‌دانه‌ها می‌توان به بهبود معنادار در شاخصهای مقاومتی بتن دست یافت. این موضوع از نظر اقتصادی و اجرایی برای صنعت ساخت و ساز بسیار حائز اهمیت است. افزون بر این، ارائه روابط همبستگی تجربی متناسب با طرح‌های اختلاط مختلف، امکان تخمین سریع مقاومت بتن در شرایط کارگاهی و سازه‌های موجود را فراهم می‌سازد و می‌تواند به تصمیم‌گیری‌های مهندسی دقیق‌تر کمک کند.

قدردانی

نویسندگان مقاله از مدیریت و پرسنل شرکت نانو بتن و شرکت آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک استان قم که در مراحل مختلف این پژوهش همکاری داشته‌اند، تقدیر و تشکر می‌نمایند.

۵- مراجع

[1] Malhotra, V.M. "Testing Hardened Concrete: Nondestructive Methods" Published Jointly by the IOWA State University Press & American Concrete Institute (ACI), 1976.

[2] Kumavat, H.R., Chandak, N.R., Patil, I.T. "Factors Influencing the Performance of Rebound Hammer Used for Non-Destructive Testing of Concrete Members: A Review" Case Studies in Construction Materials, e00491, 2021.

[3] Brozovsky, J. "Comparison of Compressive Strengths of Concrete Testing by Different of Sclerometers" Procedia Engineering, 65: 254-259, 2013.

[4] Selçuk, L., Gökçe, H.S. "Estimation of the Compressive Strength of Concrete under Point Load and its Approach to Strength Criterions"

Conshohocken, PA, 2024.

[16] ASTM C496/C496M-17, Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.

[17] ASTM C293/C293M-16, Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam With Center-Point Loading), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016.

[18] ASTM C805/C805M-18, Standard Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020.

[19] ASTM C 597-02, Standard Test Method for Pulse Velocity through Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020.

[20] Bogas, J.A., Gomes, M.G., Gomes, A. "Compressive strength evaluation of structural lightweight concrete by non-destructive ultrasonic pulse velocity method" KSCE Journal of Civil Engineering, 53(5): 962-972, 2013.

[۲۱] حبیبی، ع.، وزیری، آ.، محمدی، آ. "رابطه مقاومت فشاری با مقاومت کششی و وزن مخصوص بتن سبک ساخته شده با پوکه معدنی منطقه کردستان" تحقیقات بتن، ۵(۲): ۴۴-۳۳، ۱۳۹۱.

[22] Zacoeb, A., Ishibashi, K. "Point load test application for estimating compressive strength of concrete structures from small core" ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, 4(7): 46-57, 2009.

[۲۳] ذوالقدری، ع.، فروتن مهر، ب.، چیت فروش زاده، م.ص.، کربلایی علی، م.، عواطفی هویدا، ف. "ارتباط بین نتایج آزمایش‌های چکش اشمیت و مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی ۱۵۰ * ۱۵۰ * ۱۵۰ میلی‌متر"، دوازدهمین کنفرانس ملی بتن، تهران، ۱۳۹۹.

Evaluation of Concrete Strength Parameters with Variations in Aggregate Gradation, with Emphasis on Non-Destructive Methods

Ali M. Rajabi*

Engineering Geology Department, University of Tehran, Tehran, Iran.

S.M.S. Ghorashi

Civil Engineering Department, University of Qom, Qom.

Abstract

Destructive testing methods are among the most common approaches for determining the strength parameters of concrete. In addition to causing damage to the concrete, these methods are associated with relatively high costs. Under such circumstances, the application of non-destructive (indirect) testing methods can provide a more efficient and economical alternative. In the present study, destructive tests including uniaxial compressive strength, Brazilian tensile strength, and point load index, as well as non-destructive tests including the Schmidt hammer test and ultrasonic pulse velocity (UPV), were performed on three different concrete mix designs. The only difference among these mix designs was the aggregate gradation. The obtained results were then comparatively analyzed, and correlation relationships between the results of destructive and non-destructive methods were developed. The results indicated that variations in aggregate gradation have a significant effect on the mechanical strength parameters of concrete. Specifically, excessive use of coarse aggregates and the resulting very coarse gradation in the concrete mix design negatively affects the strength characteristics of concrete.

Keywords: Concrete resistance, Destructive methods, Non-destructive methods, Gradation, Correlation relationships.

* Corresponding Author: amrajabi@ut.ac.ir