

ارزیابی مقاومت فشاری بتن با تلفیق روشهای غیر مخرب و پردازش تصویر

حسن عراقی *

دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، پردیس دانشگاهی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.

رحمت مدن دوست

استاد، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.

میثم عفتی

دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.

چکیده

روش های غیر مخرب (NDT) برای تخمین مقاومت فشاری بتن f_c^c در محل معمولاً با آزمون های سرعت پالس اولتراسونیک و عدد بازتاب چکش، یا ترکیب آن ها (SonReb) انجام می شود. از آنجا که دقت این روش ها متأثر از شرایط بتن است، تکنیک های پردازش تصویر دیجیتال (DIP) به عنوان جایگزین هایی با حساسیت کمتر به این شرایط مطرح شده اند. در این مقاله، تلاش شد تا با رویکرد جدیدی مبتنی بر ترکیب نتایج NDT و DIP یک رابطه قابل اعتماد و تعمیم پذیر جهت تخمین f_c^c معرفی شود. برای این منظور، ۱۳۵ نمونه استوانه ای استاندارد قالب گیری شد و علاوه بر آزمون فشاری و NDT، تعدادی ویژگی توسط DIP از سطوح برش خورده آن ها استخراج گردید. نتایج به دست آمده برای آموزش و اعتبارسنجی یک مدل رگرسیون جهت تخمین f_c^c استفاده شد. به علاوه، آزمون های مشابهی بر روی مغزه هایی با قطر ۹۵ میلی متر که از سه تراز دو نمونه منشوری با ابعاد $300 \times 300 \times 180$ میلی متر حفاری شده بودند، انجام گرفت تا قابلیت معادلات پیشنهادی در تخمین مقاومت بتن اعضای سازه ای بررسی شود. یافته ها نشان دادند که ترکیب NDT و DIP در تخمین f_c^c عملکرد بهتری نسبت به مدل SonReb دارد، به طوری که مقدار R^2 برای داده های آموزش و اعتبارسنجی به ترتیب ۰/۹۰ و ۰/۹۴ به دست آمد، در حالی که مقدار R^2 برای SonReb به ترتیب ۰/۸۳ و ۰/۹۱ بود. علاوه بر این، مدل پیشنهادی مقدار f_c^c مغزه های استخراج شده از نمونه های منشوری را با R^2 برابر با ۰/۸۸ تخمین زد در حالیکه این مقدار برای مدل SonReb برابر با ۰/۸۱ به دست آمد.

واژه های کلیدی: ارزیابی مقاومت بتن، پردازش تصویر، آزمون غیر مخرب، عدد بازتاب چکش، سرعت پالس اولتراسونیک.

* نویسنده مسئول: hassanaraghi@webmail.guilan.ac.ir

۱- مقدمه

ارزیابی مقاومت بتن در سازه‌های موجود از دغدغه‌های مهندسان و از نخستین گام‌های یک طرح بهسازیست. با اینکه طرح اختلاط برای رسیدن به مقاومت مشخصه، توسط مهندسان و کارخانه تولید بتن تهیه می‌شود، لکن برخی عوامل خارج از کنترل می‌تواند منجر به کسب یک مقاومت فشاری متفاوت از انتظار اولیه گردد. تفاوت بین مقاومت بتن در محل با مقاومت قابل انتظار، ارزیابی مقاومت بتن در محل را ضروری می‌سازد.

دو روش غیر مخرب متداول برای ارزیابی مشخصات مکانیکی و فیزیکی بتن، عدد بازتاب چکش اشमित و سرعت پالس اولتراسونیک است. استفاده از عدد بازتاب چکش اشमित از ارزان ترین روش‌های ارزیابی بتن به شمار می‌رود. اصول کارکرد آن بر این اصل استوار است که بازتاب یک جسم الاستیک به سختی سطحی که جرم به آن برخورد می‌کند بستگی دارد. این سختی سطحی را میتوان به مقاومت بتن مرتبط ساخت. چکش اشमित می‌تواند یک ارزیابی نسبی و مقایسه‌ای در دسترس ارزیاب قرار دهد. به عنوان مثال مقایسه تغییرات مقاومت یک عضو در سنین مختلف، مقایسه کیفی بتن در نقاط مختلف یک عضو و مواردی از این قبیل را میتوان با استفاده از عدد بازتاب چکش اشमित مطالعه کرد. همچنین از چکش اشमित میتوان به عنوان یک روش تکمیلی در کنار یک روش قابل اعتماد دیگر و به منظور کاهش تعداد نمونه گیری‌های مخرب استفاده نمود. به هر حال نتایج آزمایش چکش اشमित متأثر از خواص سطحی بتن در لایه‌ای به عمق ۲ تا ۳ سانتیمتر بوده [۱] و بهتر است با روش‌های دیگر که توانائی ارزیابی عمق یک عضو بتنی را داشته باشد ترکیب شود.

بر خلاف نتایج چکش اشमित که وابسته به مشخصات سطحی بتن است، ارزیابی با استفاده از سرعت سیر امواج اولتراسونیک مشخصات عمق عضو بتنی را در اختیار قرار میدهد. تأثیر هرگونه ناپیوستگی (ترک و حفره) بر مشخصات بتن توسط آزمایش اولتراسونیک قابل ثبت است. بر طبق تئوری انتشار صوت در محیط جامد، سرعت سیگنال اولتراسونیک به چگالی و مدول الاستیک ماده تحت آزمایش بستگی دارد [۲]. از آنجا که این دو ماهیت فیزیکی و مکانیکی ارتباط مستقیم با مقاومت فشاری بتن دارند، کالیبراسیون بین مقاومت فشاری و سرعت پالس اولتراسونیک در یک نمونه بتنی، یک وابستگی نسبی بین این دو شاخص ایجاد

میکند. علیرغم مزایای روش پالس اولتراسونیک، وابستگی نتایج به درصد رطوبت بتن [۳]، مشخصات سنگ‌دانه [۴]، دمای هوا [۵] و تراکم آرماتورها [۶] می‌تواند دقت و کارائی این روش را دچار چالش نماید. لذا به خوبی ثابت شده است که رابطه بین سرعت پالس اولتراسونیک و مقاومت بتن، به اندازه کافی برای اهداف عملی قابل اعتماد نیست [۷].

برخی محققین تلاش کردند با ترکیب روش اولتراسونیک و یک آزمون غیر مخرب دیگر نظیر آزمون عدد بازتاب چکش اشमित (ترکیب موسوم به SonReb) به نتایج قابل اعتماد تری دست یابند. از جمله امینی و همکارانش در سال ۲۰۱۶ [۸] یک مدل ترکیبی بر اساس نتایج اولتراسونیک و چکش اشमित در ساختار چند جمله‌ای درجه دوم پیشنهاد دادند. زمانی که داده‌ها با کمک شبکه عصبی مصنوعی (ANN) تفسیر می‌شوند، نرخ پیش بینی نتایج بالاتری به دست خواهد آمد. آستریس و همکاران [۹] قابلیت شبکه عصبی مصنوعی را برای پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن با استفاده از نتایج آزمایشات مخرب در سازه‌های موجود بر مبنای یک مجموعه داده بزرگ شامل نتایج آزمون غیر مخرب و مقاومت فشاری مغزه‌های بتنی نشان دادند.

گرچه ترکیب نتایج دو آزمون غیر مخرب با روش‌های آماری یا روش‌های محاسبات نرم می‌تواند تا حدی دقت ارزیابی را بهبود دهد [۱۰]، از آنجا که نتایج آزمایشات اولتراسونیک و چکش اشमित به شرایط بتن هنگام آزمایش خصوصاً درصد رطوبت، کرناسیون و نحوه تراکم حساس بوده و تغییر در این شرایط می‌تواند نتایج متفاوتی را به دست دهد، تکنیک‌های غیر مخرب دیگری نیز توسط محققین دنبال شده تا فارغ از شرایط نگهداری بتن، ویژگی‌های قابل اعتمادتری از بتن را استخراج کند و با استفاده از آن ویژگی‌ها بتوان مقاومت فشاری بتن را تخمین زد. به عنوان مثال استفاده از پردازش تصویر (IP) سطح برش خورده بتن یا سطح دست نخورده آن برای دستیابی به برخی ویژگی‌ها توسط محققین مختلفی دنبال شده است [۱۳ و ۱۴]. باسیگیت و همکاران در سال ۲۰۱۲ [۱۵] با استفاده از پردازش تصویر سطح برش خورده بتن، درصد مقادیر حفرات هوا، سنگ‌دانه و سیمان را تعیین و یک رابطه تجربی حاصل از رگرسیون بین مقاومت فشاری و سه پارامتر حاصل از پردازش تصویر ارائه نمودند. در سال ۲۰۱۷ غمزه دوان و همکاران [۱۶] نتایج پردازش تصویر ۹۶ نمونه استوانه

گرفتند به نحوی که رابطه پیشنهادی با دقت قابل قبولی بتواند نمونه‌های مغزه گیری شده از یک عضو سازه ای را نیز تخمین بزند. با استفاده از پردازش تصویر دیجیتال سطح برش خورده بتن ۳ ویژگی استخراج شد که انتظار می‌رود با مقاومت فشاری نمونه ارتباط داشته باشد. سپس تلاش شد تا با ترکیب نتایج DIP و NDT با استفاده از رگرسیون رابطه ای با مقاومت فشاری برقرار شود.

تقریباً ۸۰ درصد از داده‌ها، یعنی ۲۰ مجموعه شامل ۱۰۵ نمونه، با استفاده از رگرسیون برای شناسایی بهترین برآورد مقاومت فشاری مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. علاوه بر این، ۲۰ درصد باقیمانده داده‌ها، یعنی ۶ مجموعه شامل ۳۰ نمونه، برای آزمون اعتبار معادلات استفاده شد. به علاوه، روابط پیشنهادی با نتایج مغزه‌های حفاری شده از دو نمونه منشوری تأیید شد. برخی از مطالعات قبلی در مورد تشخیص سنگ‌دانه‌سنگ‌دانه‌ها در سطح برش بتن با استفاده از DIP بر روش‌هایی تکیه دارند که سنگ‌دانه‌ها را صرفاً بر اساس شدت مقیاس خاکستری در یک محدوده خاص (بین ۱۴۰ تا ۲۵۵) از زمینه سیمانی و حفرات هوا متمایز می‌کند [۱۵]. با این حال، این روش‌ها را نمی‌توان برای کاربردهای عملی که در آن سنگ‌دانه‌هایی با رنگ‌های مختلف در بتن وجود دارد، تعمیم داد. مقاله فعلی روشی را برای تشخیص سنگ‌دانه با رنگ‌های مختلف ارائه داده است.

۲- روش پژوهش

۲-۱- مشخصات نمونه‌ها

در مجموع ۱۳۵ نمونه استوانه ای به قطر ۱۰۰ میلیمتر و ارتفاع ۲۵۰ میلیمتر (۳۳ گروه) در آزمایشگاه قالب گیری شد. این گروه‌های مختلف با پنج متغیر شامل نسبت آب به مواد سیمانی (W/C)، مقدار مواد سیمانی در حجم واحد بتن، وضعیت تراکم، حداکثر اندازه اسمی سنگ‌دانه (MAS) و مواد افزودنی برای مجموعه های آموزشی (train) و اعتبارسنجی (validation) ساخته شد (جدول ۱). مقادیر هر مجموعه برابر با میانگین ۳، ۶ یا ۱۲ نمونه با مشخصات مشابه است. سایر پارامترها و شرایط آزمون برای کلیه نمونه‌ها ثابت نگه داشته شد. سیمان پرتلند تیپ ۲ سیمان تهران و سنگ‌دانه یکسان در ساخت همه نمونه‌ها استفاده شد. تحلیل شیمیائی سیمان و سنگ‌دانه مصرفی در جدول ۲ ارائه شده است. با

بتنی را شامل مقادیر میانگین، میانه و انحراف معیار هیستوگرام تصویر سطح برش خورده بتن، با آموزش یک شبکه عصبی مصنوعی (ANN) به ویژگی های مکانیکی بتن از جمله مقاومت فشاری مرتبط ساختند. آنها توصیه کردند که استفاده از این روش جایگزین مناسبی برای روش‌های سنتی مخرب و غیرمخرب است که در حال حاضر برای شناسایی خواص مکانیکی بتن استفاده می‌شود. در کار مشابهی عمران واریس و همکارانش در سال ۲۰۲۲ [۱۷] ویژگی‌های آماری (میانگین حسابی، انحراف معیار، میانه، ممان سوم، چولگی و آتروپی) هیستوگرام تصویر سطح برش خورده ۱۶۲ نمونه استوانه بتنی را با استفاده از تکنیک ANN و سایر روش‌های محاسبات نرم به مشخصات مکانیکی بتن از جمله مقاومت فشاری ارتباط دادند. دقت روش IP/ANN پیشنهادی آنها به ۹۹/۷ درصد رسید. آنها برای پردازش تصویر ابتدا با استفاده از دوربین دیجیتال ۲۴ مگاپیکسل (تصویر ۴۰۰۰ در ۶۰۰۰ پیکسل) در شرایط نوری یکسان (شدت نور ۲۰۰۰ لوکس)، فاصله یکسان (۶۰۰ میلیمتر از دوربین تا سطح نمونه) و حساسیت نور (ISO Value) برابر با ۱۰۰۰ از سطح برش خورده و سطوح خارجی همه نمونه‌ها، عکسبرداری و سپس تصویر را با استفاده از پردازش تصویر نرم افزار MATLAB بریده و از قالب رنگ اصلی (RGB) به قالب خاکستری (Grayscale) تبدیل کردند تا به یک تصویر مربعی ۲۵۶ در ۲۵۶ پیکسل تبدیل شود.

علیرغم اینکه در مطالعات قبلی آزمون‌های غیر مخرب با دقت‌های خوبی مقاومت فشاری بتن را ارزیابی کرده اند، دستیابی به یک رابطه عمومی برای کاربردهای عملی میسر نمی‌باشد. یک یافته اخیر توسط دوان و همکاران در سال ۲۰۲۴ [۱۸] نشان دادند که علیرغم دقت بالای تخمین مقاومت فشاری بر مبنای نتایج پردازش تصویر به دست آمده از نمونه‌های تولید شده در آزمایشگاه، میزان موفقیت برای نمونه‌های مغزه گیری شده از سازه‌های بتنی در کارگاه‌های ساختمانی رضایت بخش نبوده است. بیشتر تحقیقات گذشته بر روی پردازش تصویر به تنهایی متمرکز شده است [۱۶ و ۱۸ و ۱۷] یا ترکیبی از روش‌های غیر مخرب به تنهایی [۸ و ۹ و ۱۹ و ۲۰ و ۲۱] متمرکز بوده است.

مقاله حاضر ترکیب جدیدی را پیشنهاد می‌کند که در آن نتایج DIP و NDT به طور همزمان برای افزایش دقت و به حداقل رساندن تأثیر شرایط بتن در طول آزمایش مورد استفاده قرار

توجه به اینکه برای جداسازی تصویر سنگ دانه از زمینه سیمانی از روش های شیمیائی استفاده خواهد شد، شناسائی مشخصات شیمیائی سنگ دانه برای مقایسه در مطالعات آتی حائز اهمیت است.

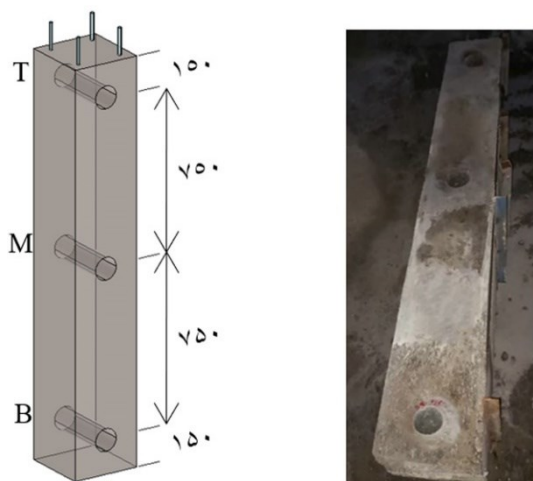
نمونه هایی که با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۳۵ ساخته شده (مجموعه های ۱۸ تا ۲۷ و ۳۲ تا ۳۳ طبق جدول ۱) حاوی ۱٪ وزنی فوق روان کننده (SP) بر پایه پلی کربوکسیلات اتر نسبت به وزن مواد سیمانی می باشد. همچنین ۲۰٪ از وزن سیمان در ساخت مجموعه های ۲۳ تا ۲۶ (طبق شماره گذاری جدول ۱) با دوده سیلیس جایگزین شده است. برای ساخت کلیه نمونه ها با استفاده از قالب استوانه ای فولادی با جنس مشابه در سه لایه بتن ریزی و هر لایه با استفاده از ۲۵ ضربه میله فولادی به قطر ۱۲ میلیمتر متراکم گردید (وضعیت تراکم استاندارد) یا بدون تراکم قابل توجه در یک مرحله بتن ریزی گردید (وضعیت تراکم ضعیف).

جدول ۱- متغیرهای ساخت بتن استوانه های قالب گیری شده

شماره مجموعه	کاربرد داده	تعداد نمونه	مواد سیمانی (kg/m ³)	MAS (mm)	W/C	وضعیت تراکم**	سایر
۱	آموزش	۳	۳۵۰	۲۰	۰/۶۰	استاندارد	-
۲	آموزش	۳	۳۵۰	۲۰	۰/۶۰	ضعیف	-
۳	آموزش	۶	۳۵۰	۲۵	۰/۶۰	استاندارد	-
۴	آموزش	۶	۳۵۰	۲۵	۰/۶۵	ضعیف	-
۵	آموزش	۳	۳۵۰	۲۰	۰/۶۵	ضعیف	-
۶	آموزش	۳	۳۵۰	۲۰	۰/۶۵	استاندارد	-
۷	آموزش	۶	۳۵۰	۲۰	۰/۴۵	ضعیف	-
۸	آموزش	۶	۳۵۰	۲۵	۰/۴۵	استاندارد	-
۹	آموزش	۶	۴۲۰	۲۵	۰/۵۰	ضعیف	-
۱۰	آموزش	۳	۴۲۰	۲۵	۰/۶۰	استاندارد	-
۱۱	آموزش	۳	۴۲۰	۲۵	۰/۶۰	ضعیف	-
۱۲	آموزش	۳	۴۲۰	۲۰	۰/۵۰	استاندارد	-
۱۳	آموزش	۳	۴۲۰	۲۵	۰/۵۰	استاندارد	-
۱۴	آموزش	۶	۴۲۰	۲۵	۰/۴۵	استاندارد	-
۱۵	آموزش	۶	۵۲۵	۲۰	۰/۴۰	استاندارد	-
۱۶	آموزش	۳	۵۲۵	۲۵	۰/۴۰	استاندارد	-
۱۷	آموزش	۳	۵۲۵	۲۵	۰/۴۰	ضعیف	-
۱۸	آموزش	۳	۵۲۵	۲۰	۰/۳۵	ضعیف	SP
۱۹	آموزش	۳	۵۲۵	۲۰	۰/۳۵	استاندارد	SP
۲۰	آموزش	۶	۵۲۵	۲۵	۰/۳۵	استاندارد	SP
۲۱	آموزش	۳	۵۲۵	۲۵	۰/۵۰	ضعیف	-
۲۲	آموزش	۳	۶۰۰	۲۰	۰/۳۵	استاندارد	SP
۲۳	آموزش	۳	۶۰۰	۲۰	۰/۳۵	ضعیف	SP
۲۴	آموزش	۳	*۶۰۰	۲۰	۰/۳۵	استاندارد	SP+SF
۲۵	آموزش	۳	*۶۰۰	۲۰	۰/۳۵	ضعیف	SP+SF
۲۶	آموزش	۳	*۶۰۰	۲۵	۰/۳۵	استاندارد	SP+SF
۲۷	آموزش	۳	*۶۰۰	۲۵	۰/۳۵	ضعیف	SP+SF
۲۸	اعتبار سنجی	۳	۳۵۰	۲۵	۰/۶۰	استاندارد	-
۲۹	اعتبار سنجی	۳	۳۵۰	۲۵	۰/۶۰	ضعیف	-
۳۰	اعتبار سنجی	۶	۳۵۰	۲۵	۰/۶۵	استاندارد	-
۳۱	اعتبار سنجی	۱۲	۴۲۰	۲۵	۰/۵۰	استاندارد	-
۳۲	اعتبار سنجی	۳	۶۰۰	۲۵	۰/۳۵	استاندارد	SP
۳۳	اعتبار سنجی	۳	۶۰۰	۲۵	۰/۳۵	ضعیف	SP
تعداد کل		۱۳۵					

سیمان ۴۸۰ kg/m³ + دوده سیلیس ۱۲۰ kg/m³ *: دوده سیلیس SF, فوق روان کننده SP, حداکثر اندازه اسمی سنگ دانه MAS: ** وضعیت تراکم استاندارد شامل بتن ریزی در سه لایه و تراکم هر لایه با ۲۵ ضربه میله فولادی به قطر ۱۲ میلیمتر و تراکم ضعیف فاقد مراحل مذکور می باشد.

علاوه بر نمونه‌های استوانه‌ای قالب‌گیری شده، ۲ نمونه منشوری با ابعاد $1800 \times 300 \times 300$ میلیمتر ساخته شد تا قابلیت روابط پیشنهادی در ارزیابی مقاومت فشاری مغزه‌های حفاری شده از اجزای سازه ای سنجیده شود. مصالح ساخت و نحوه عمل‌آوری این دو نمونه مشابه نمونه‌های استوانه‌ای و طرح اختلاط بتن مصرفی در ساخت آنها مطابق جدول ۳ می‌باشد. برای کاهش آسیب این دو نمونه در هنگام جابه‌جائی و مغزه‌گیری، با ۴ عدد میلگرد آج دار S400 به قطر اسمی ۱۶ میلیمتر در راستای محور نمونه و ۵ عدد خاموت بسته فولادی به قطر اسمی ۸ میلیمتر (آرماتور عرضی) مسلح شد. بتن ریزی درون قالب فولادی منطبق با شرایط کارگاهی متداول از سمت بالا (مشابه ستون) انجام شد. در سن ۹۰ روزه، پیش از انجام آزمایشات از سه ناحیه فوقانی، میانی و پائین هر نمونه، ۳ مغزه به قطر ۹۵ میلیمتر حفاری شد (شکل ۱). این مغزه‌ها به ترتیب با حروف T#، M# و B# علامتگذاری شدند که در آن # شماره نمونه (۱ یا ۲) است. سپس دو لبه مغزه بریده شد تا طول هر مغزه به اندازه ۱۹۰ میلیمتر تنظیم شود. در این حالت نسبت ارتفاع به قطر مغزه برابر با ۲ می‌باشد. لبه‌های باقیمانده از برش عرضی مغزه پس از ساب درون کیسه پلاستیکی نفوذ ناپذیر نگهداری شد تا برای پردازش تصویر استفاده شود.



الف- نمونه بعد از مغزه‌گیری
ب- موقعیت مغزه‌ها
شکل ۱- نمونه‌های منشوری

۲-۲- برنامه آزمایشگاهی

در سن ۹۰ روزه آزمون‌های غیر مخرب (NDT) و آزمون فشاری بر روی نمونه‌های استوانه‌ای قالب‌گیری شده و مغزه‌های حفاری

جدول ۲- مشخصات شیمیائی سنگ‌دانه و سیمان

ترکیب شیمیائی	درشت دانه	سیمان پرتلند
CaO	۹/۳	۶۰/۲۶
SiO ₂	۶۰/۶	۲۴/۷۶
Al ₂ O ₃	۱۱/۴	۵/۴۱
Fe ₂ O ₃	۲/۵	۲/۵۵
MgO	۲/۰	۱/۸۵
SO ₃	۰/۱<	۱/۷۵
K ₂ O	۲/۶	۰/۵۰
TiO ₂	۰/۳	۰/۱۸
Na ₂ O	۲/۰	۰/۱۲
I O. L.	۹/۳	۲/۶۲

جدول ۳- طرح اختلاط بتن نمونه‌های منشوری

سیمان	$\frac{W}{C}$	درشت‌دانه	ریزدانه	MAS*
(kg/m ³)		(kg/m ³)	(kg/m ³)	(mm)
۳۵۰	۰/۶۰	۴۵۵	۴۵۵	۲۵

MAS*: داکتر اندازه اسمی سنگ‌دانه در طرح اختلاط

عمل‌آوری نمونه‌ها به مدت ۷ روز در محدوده دمای ۲۰ تا ۲۴ درجه سانتیگراد با استفاده از گونی مرطوب و پوشش پلاستیکی انجام شد. پیش از انجام آزمایشات، لبه بتن ریزی شده نمونه‌ها چنان بریده شد که ارتفاع استوانه ۲۰۰ میلیمتر گردد (نسبت ارتفاع به قطر برابر با ۲). لبه باقیمانده از برش به منظور پردازش تصویر آماده سازی شد. این آماده سازی شامل ساییدن سطح برش خورده با کاغذ سمباده سیلیکون کاربید شماره ۱۰۰ با دور آرام فرز تارسیدن به سطح فاقد خط و خش می‌باشد. از آنجا که عملیات برش به صورت مرطوب انجام شده، بلافاصله نمونه‌ها با استفاده از دستمال پارچه ای خشک گردید و درون کیسه پلاستیکی غیر قابل نفوذ نگهداری شد تا علاوه بر تنظیم رطوبت یکسان در همه نمونه‌ها، از کرناسیون سطوح در تماس با هوا تا حد امکان جلوگیری شود. گرچه ویژگی‌های مستخرج از پردازش تصویر سطح برش خورده در تراز تقریبی ۵۰ میلیمتری بالای نمونه‌ها نماینده مشخصات کل ارتفاع استوانه بتنی نخواهد بود، و به‌ویژه آب انداختگی در سطح فوقانی و تراکم بیشتر در نواحی پائین موجب تغییراتی در مشخصات سطوح مختلف تراز نمونه می‌گردد، اما از آنجا که همه نمونه‌ها از یک تراز یکسان بریده شده‌اند، می‌توان یک روش قیاسی بین همه نمونه‌ها به دست آورد. از اینرو برخی محققان نیز رویکرد مشابهی در مطالعات پیشین داشته‌اند [۱۶ و ۱۸].

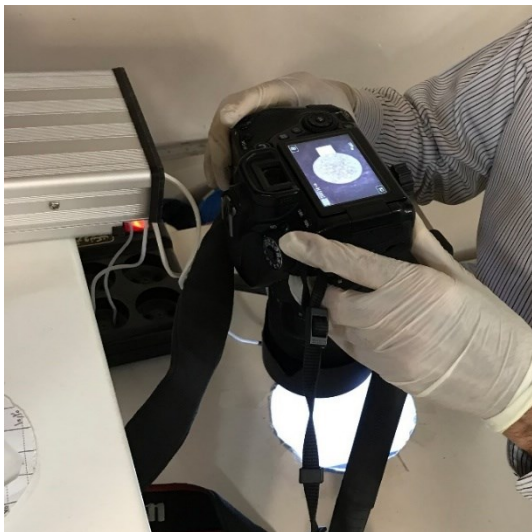
سطوح برش و ساب خورده هر لبه نمونه با دوربین دیجیتال مطابق شکل ۴ از فاصله یکسان ۱۲۰ میلیمتر عکسبرداری گردید. شرایط مذکور برای همه نمونه‌های استوانه‌ای قالب‌گیری شده و مغزه‌های حفاری شده از نمونه‌های منشوری به صورت یکسان حفظ شد تا نتایج قابل مقایسه باشند.



شکل ۳- آزمون سرعت پالس اولتراسونیک

شده از نمونه‌های منشوری انجام شد. منظور از آزمون‌های غیر مخرب در پژوهش حاضر شامل آزمون تعیین عدد بازتاب چکش اشمیت و آزمون تعیین سرعت پالس اولتراسونیک به ترتیب مطابق با ASTM C805 و ASTM C597 می‌باشد [۲۲ و ۲۳].

مطابق شکل ۲ آزمون اندازه‌گیری عدد بازتاب چکش اشمیت در حالی که نمونه‌ها تحت فشار جک هیدرولیک تا حدود ۱۵٪ مقاومت فشاری قابل انتظار قرار دارند اجرا گردید. عدد بازتاب چکش بر روی سه خط در امتداد محوری روی سطح پیرامونی استوانه به نحوی که هر خط با زاویه ۱۲۰ درجه نسبت به هم و در هر خط ۵ نقطه، اندازه‌گیری شد. میانگین اعداد بازتاب قابل اعتماد به عنوان عدد بازتاب آن نمونه محاسبه و با حرف R نامگذاری گردید. اعداد بازتاب قابل اعتماد، اعداد قرائت شده‌ای هستند که حداکثر ۶ واحد با مقدار میانگین تفاوت داشته باشند.



شکل ۴- تصویر برداری از سطح برش خورده در محفظه تاریک



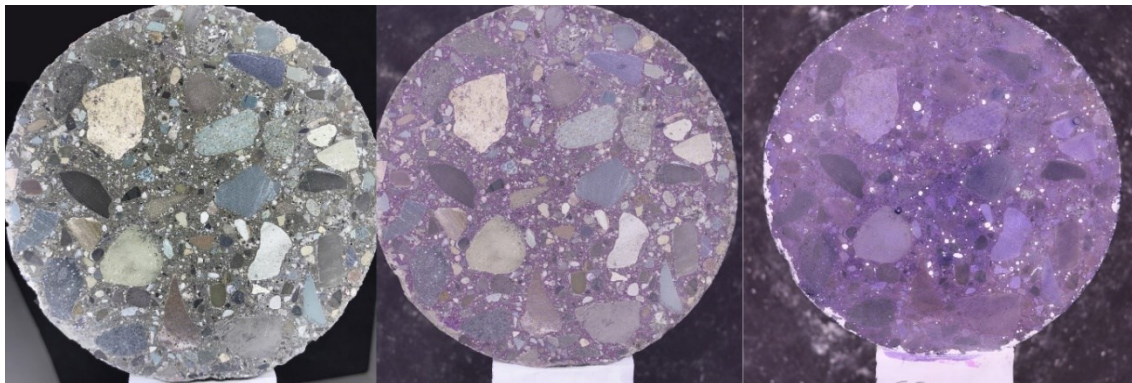
شکل ۵- آزمون بازتاب چکش تحت بار فشاری

سه نوع تصویر از هر سطح نمونه ثبت شد (در مجموع ۴۰۵ تصویر از سطوح برش خورده نمونه‌های استوانه‌ای قالب‌گیری شده و ۱۸ عکس از سطح برش خورده مغزه‌های حفاری شده از نمونه‌های منشوری). سه نوع تصویر شامل تصویر اصلی (نوع اول)، تصویر پس از تغییر رنگ سیمان (نوع دوم) و تصویر پس از پر شدن حفره ها با پودر (نوع سوم) در شکل ۵ نشان داده شده است. تصویر نوع اول بلافاصله پس از ساب سطح برش خورده ثبت شد تا برای اندازه‌گیری حداکثر اندازه سنگ‌دانه قابل مشاهده در سطح (S) از این نوع تصویر استفاده گردد. سپس محلول ۱٪ فنول فتالین

آزمون سرعت پالس اولتراسونیک با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری دیجیتال اولتراسونیک موسوم به PUNDIT مطابق شکل ۳ با آرایش مستقیم انجام شد. سرعت پالس مستقیم اولتراسونیک که با P نام‌گذاری شد از تقسیم طول نمونه به زمان سیر پالس بین گیرنده و فرستنده محاسبه می‌شود. پس از انجام آزمایشات غیر مخرب، نمونه‌ها تا رسیدن به مقاومت فشاری نهایی f'_c بارگذاری شدند. لبه برش خورده درون یک محفظه تاریک که مجهز به ۴۰ عدد لامپ LED با زاویه ۴۵ درجه دور تا دور نمونه است، قرار گرفت. تصویر دیجیتال با ابعاد 6000×4000 پیکسل (۲۴ مگاپیکسل) از

و پس از خشک شدن رنگ با استفاده از پودر تالک کل حفرات سطح پر شد. با این روش حفره‌های هوا در سطح برش خورده (A) به رنگ سفید در پس زمینه تیره مشخص شده و تصویر نوع سوم در این حالت ثبت گردید. حداقل اندازه حفره قابل تشخیص به کیفیت عکس بستگی دارد. اما از آنجا که کیفیت عکس و فاصله لنز تا سطح نمونه در همه نمونه ها یکسان می‌باشد، یک روش قابل مقایسه به دست خواهد داد.

را روی سطح ساب خورده اسپری کرده تا ماتریس سیمانی روی سطح ارغوانی شده و سطوح سنگ‌دانه از آن مجزا شوند. با این روش صرفنظر از رنگ‌های متنوع سنگ‌دانه، می‌توان ماتریس سیمانی را از بخش سنگ‌دانه مجزا کرد. آنگاه تصویر نوع دوم برای تعیین مقدار ماتریس سیمانی در سطح برش خورده (C) ثبت گردید. در مرحله آخر کل سطح با یک لایه رنگ تیره رقیق شده پوشیده



ج- نوع سوم (بعد از پر کردن حفرات با -ب- نوع دوم (بعد از محلول فنول فتالین) الف- نوع اول (تصویر اصلی) شکل ۵- سه نوع تصویر که از سطح برش خورده هر نمونه ثبت شد

خودکار رنگ (auto-color balance) و فیلتر کردن است. ابزار بریدن برای قطع کردن لبه‌های تصویر و تبدیل سطح مقطع دایره ای به یک مقطع مربعی با ابعاد یکسان در همه تصاویر استفاده شد. تصاویر رنگی به صورت مجموعه ای از سه آرایه دو بعدی در کانال‌های قرمز، سبز و آبی نمایش داده می‌شود. با استفاده از نرم‌افزار ImageJ تصاویر RGB به صورت مجموع وزنی از اجزای قرمز و سبز و آبی به قالب خاکستری تبدیل شد. این یکی از مراحل پیش پردازش است و در آن جزء خاکستری که با GS نشان داده می‌شود از معادله (۱) به دست می‌آید:

$$GS = 0.298 \times Red + 0.589 \times Green + 0.113 \times Blue \quad (1)$$

تعادل رنگ، تنظیم کلی شدت رنگ‌هایی است که معمولاً رنگ های قرمز و سبز و آبی هستند. هدف مهم این تنظیم، جلوه دادن رنگ های مشخصی است. ابزار تعادل رنگ خودکار در نرم افزار ImageJ به طور خودکار روشنایی یک رنگ خاص را به صورت خطی بین مقادیر حداقل و حداکثر تنظیم می‌کند. این دو مقدار محدوده نمایش را تعریف می‌کنند. این ابزار به طور خودکار تصاویر را با نگاشت خطی در محدوده ۰ تا ۲۵۵ نمایش می‌دهد.

۳-۲- پردازش تصویر

یک تصویر را میتوان به حالت دیجیتال تبدیل کرد. پردازش تصویر دیجیتال (DIP) شامل تحلیل و ویرایش تصاویر با استفاده از رایانه به منظور استخراج اطلاعات مشخصی از تصویر می‌باشد. نرم‌افزارهای مختلفی از جمله ImageJ برای این منظور توسط سایر محققین استفاده شده است [۱۵ و ۲۴ و ۲۵ و ۲۶]. این نرم‌افزارها فایل تصویر را در قالب یک ماتریس به محیط برنامه می‌برند. هر جزء این ماتریس یک پیکسل نام دارد.

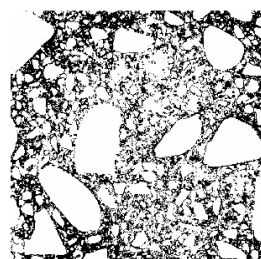
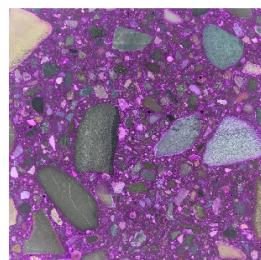
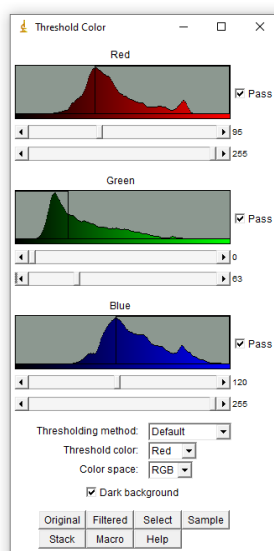
در پژوهش حاضر پردازش تصویر سطوح برش خورده با استفاده از نرم‌افزار ImageJ انجام شد که یک نرم‌افزار با متن باز توسعه یافته توسط انجمن ملی سلامت امریکا (NIH) در محیط JAVA می‌باشد. مراحل پردازش تصویر در شکل ۶ آمده است. پیش از تحلیل تصاویر، عملیات پیش پردازش بر روی هر سه نوع تصویر اعمال شد تا اطمینان حاصل شود که تصاویر همه نمونه‌ها استانداردسازی شده و نتایج قابل مقایسه ای از تحلیل آنها به دست خواهد آمد.

در این پژوهش، پیش پردازش شامل بریدن (crop)، تعادل

آبی تا ۲۵۵ و رنگ سبز بین ۰ تا مقداری نزدیک به نقطه اوج هیستوگرام سبز که به صورت دستی به نحوی انتخاب می شود که بهترین نتیجه جداسازی سنگدانه از ماتریس سیمانی را به دست بدهد. در نهایت این تصاویر به حالت باینری تبدیل شد. تصاویر باینری فقط حاوی پیکسل هائی با ارزش ۰ (سیاه) یا ۲۵۵ (سفید) هستند. شکل ۷ نشان می دهد که تکنیک مذکور چگونه در جداسازی سنگدانه ها از ماتریس سیمانی موفق بوده است.

پیش پردازش تصاویر نوع سوم شامل تنظیم اندازه، بریدن و تبدیل به قالب خاکستری ۸ بیت است. سپس جداسازی حفرات هوا در تصویر با عملگر آستانه گذاری با تنظیم پیکسل های سفید بین ۱۲۸ تا ۲۵۵ اعمال شد. در نهایت تصویر به حالت باینری تبدیل گردید. شکل ۸ نشان می دهد که چگونه محدود کردن مقادیر هیستوگرام بین ۱۲۸ تا ۲۵۵ منجر به جداسازی پیکسل های تیره تر در تصویر شده است.

با استفاده از پردازش تصویر ۳ ویژگی S، C و A به ترتیب از تصاویر نوع اول و دوم و سوم استخراج شد. برای استخراج حداکثر اندازه سنگدانه قابل اندازه گیری در سطح برش خورده (S) در نرم افزار ImageJ ابتدا با دانستن یک اندازه مشخص، تصاویر مقیاس شده و سپس با ابزار اندازه گیری بزرگترین خط درون بزرگترین سنگدانه که در سطح برش خورده دیده می شود ترسیم شد. نرم افزار بر اساس مقیاس تنظیم شده در مرحله قبل طول این پاره خط را محاسبه می نماید.



شکل ۷- جداسازی سنگدانه ها از ماتریس سیمانی با تکنیک آستانه گذاری تصاویر نوع دوم



شکل ۶- فلوچارت مراحل پردازش تصویر

تکنیک های فیلتر کردن تصویر به دسته ای از الگوریتم ها یا فرایندها گفته می شود که با تغییر مقادیر پیکسل ها برای تغییر یا اصلاح مشخصی در تصویر استفاده می شود. این روش ها شامل اعمال عملگرهای ریاضیاتی مختلفی یا فیلترهایی بر روی تصویر به منظور دستیابی به اهدافی نظیر کاهش نویز، وضوح تصویر (sharpening)، محو کردن (blurring)، تشخیص لبه و استخراج ویژگی ها می باشد. یک فیلتر تارکننده گاوسی (gaussian blur) برای صاف کردن از کانولوشن با تابع گاوسی استفاده می کند. الگوی عملگر گاوسی دارای مقداری است که توسط رابطه گاوسی تنظیم شده است.

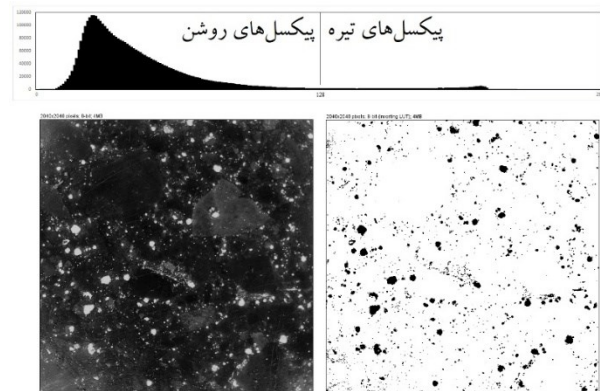
عملگر آستانه گذاری (thresholding) پیکسل هایی را با یک مقدار خاص یا در یک محدوده مشخص انتخاب کرده، و برای یافتن موضوعات مشخص درون یک تصویر با دانستن مقدار یا محدوده روشنائی استفاده می شود.

پیش پردازش تصاویر نوع اول شامل بریدن تصویر و تبدیل سطح مقطع دایره به مربع با ابعاد ۲۴۰۰×۲۴۰۰ پیکسل است. پیش پردازش تصاویر نوع دوم شامل بریدن، تنظیم اندازه، تعادل رنگ خودکار و اعمال فیلتر تارکننده گاوسی با مقدار سیگما برابر با ۲ می باشد. سپس آستانه گذاری رنگی با تنظیم رنگ قرمز بین مقدار اوج هیستوگرام قرمز تا ۲۵۵، رنگ آبی بین مقدار اوج هیستوگرام

بیان ریاضیاتی آمده است. گرچه مقادیر C و A مقادیر دقیق حجم سیمان و حجم هوا در بتن سخت شده نمی باشند، اما انتظار می رود ارتباط معناداری بین این ویژگی های سطحی با مقاومت فشاری بتن برقرار باشد.

$$C(\%) = \frac{\text{تعداد پیکسل های سیاه تصویر نوع دوم}}{5760000} \times 100 \quad (2)$$

$$A(\%) = \frac{\text{تعداد پیکسل های سیاه تصویر نوع سوم}}{5760000} \times 100 \quad (3)$$



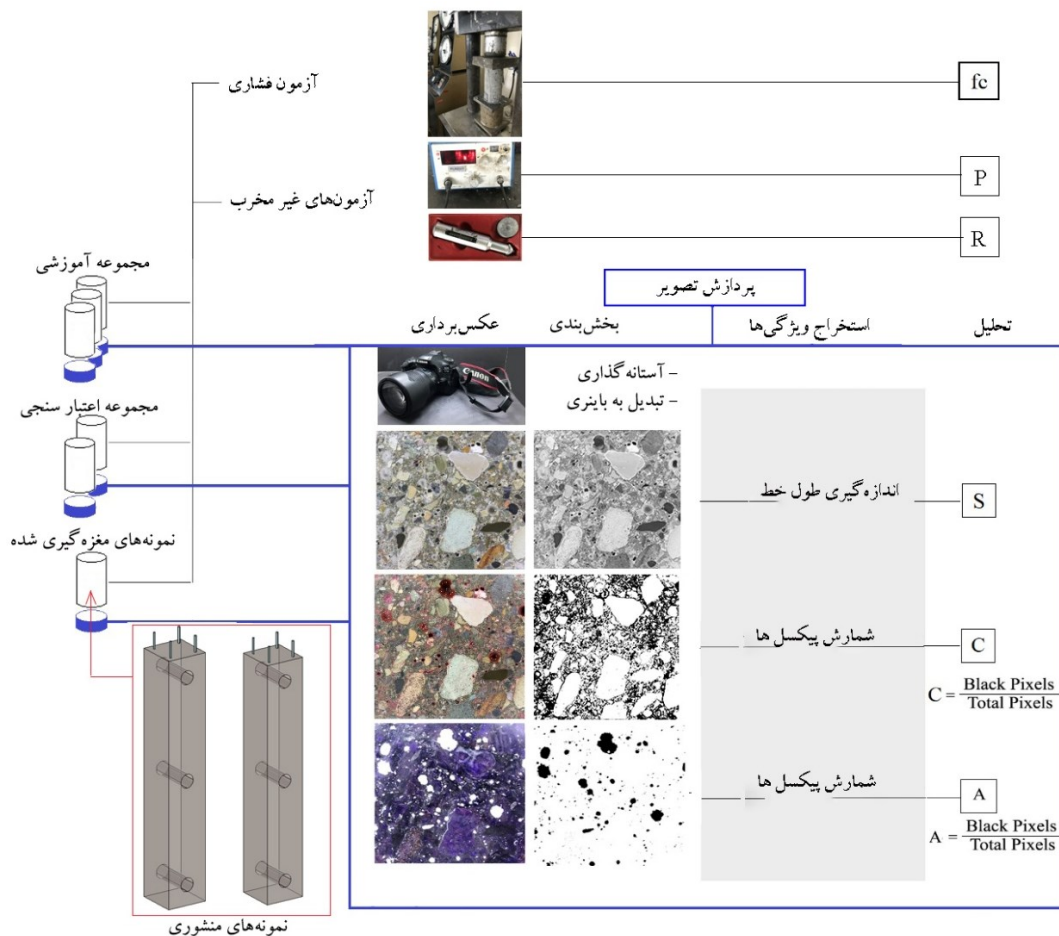
شکل ۸- جداسازی حفرات هوا با تکنیک آستانه گذاری تصاویر

نوع سوم

۲-۴- تحلیل داده ها

داده های به دست آمده از مجموعه آزمایشات شامل ۶ نوع داده با نامگذاری A, C, R, P, S و f_c می باشد. شماتیک فرآیند استخراج داده ها در شکل ۹ آمده است. مجموعه داده های به دست آمده از نمونه های استوانه ای قالب گیری شده دامنه ای از مشخصات متداول بتن مورد استفاده در صنعت ساختمان را پوشش می دهد (جدول ۴).

بعد از پیش پردازش تصاویر نوع دوم و سوم، تصاویر باینری در دسترس است که فقط حاوی پیکسل های سیاه و سفید خواهد بود. با محاسبه نسبت تعداد پیکسل های سیاه در تصاویر نوع دوم و سوم به تعداد کل پیکسل ها (۵۷۶۰۰۰۰) به ترتیب تخمینی از نسبت سطحی ماتریس سیمانی (C) و نسبت سطحی حفرات هوای قابل مشاهده (A) محاسبه خواهد شد. این موضوع در روابط ۲ و ۳ به



شکل ۹- خلاصه شماتیک از فرایند استخراج داده ها

شده است. در جدول ۵ برخی روابط تجربی پیشنهادی در مقالات مشابه ارائه شد.

جدول ۵- مدل‌های پیشنهادی رگرسیون توسط محققین برای تعیین مقاومت فشاری بتن با ترکیب آزمون‌های غیر مخرب

مدل	شماره مرجع	نویسنده اول	سال انتشار
نمایی	[۱۹]	Logothetis	۱۹۷۸
توانی	[۲۰]	Kheder	۱۹۹۹
خطی	[۲۱]	Erdal	۲۰۰۹
توانی	[۲۷]	Breysse	۲۰۱۲
چند جمله‌ای	[۸]	Amini	۲۰۱۶
توانی	[۱۰]	Rashid	۲۰۱۷

در پژوهش حاضر از مدل توانی (Power) در قالب رابطه ۵ استفاده شد.

$$f_c = a \times X_1^b \times X_2^c \dots \times X_M^m \quad (5)$$

که در آن f_c مقاومت فشاری، M تعداد کل متغیرهای وابسته (ویژگی‌ها)؛ a ، b ، c و ... m اعداد ثابت هستند و X_1 ، X_2 و ... X_M مقادیر متغیر از جمله P و R و ... می‌باشند. همچنین در سال ۲۰۱۲ باسیگیت و همکاران از قالب مشابهی برای تخمین مقاومت فشاری بر اساس متغیرهای به دست آمده از پردازش تصویر استفاده کرده اند [۱۵].

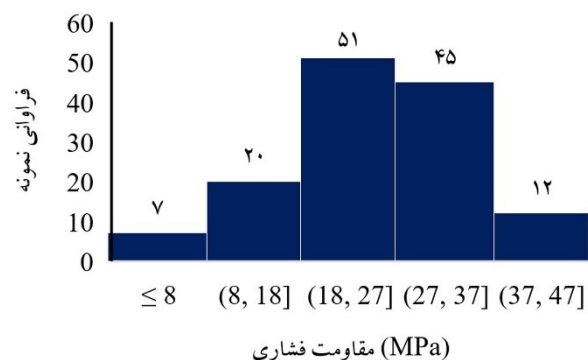
۳- نتایج و بحث

میانگین نتایج به دست آمده از مجموع آزمون‌های فشاری، پردازش تصویر و آزمون‌های غیر مخرب برای هر یک از مجموعه نمونه‌های استوانه‌ای قالب گیری شده با طرح اختلاط مشابه در جدول ۵ و نتایج مربوط به مغزه‌های حفاری شده از نمونه‌های منشوری در جدول ۶ ارائه گردیده است. بررسی نتایج میانگین مقاومت فشاری مغزه‌های حفر شده از یک تراز در دو نمونه منشوری (f_{core}) نشان داد که مقاومت فشاری بتن در ترازهای پائین تر بیشتر از ترازهای بالاتر می‌باشد. این موضوع در نمودار ۲ نشان می‌دهد که مقاومت فشاری میانگین در تراز فوقانی حدود ۲۴٪ کمتر از تراز پائین است. این موضوع می‌تواند به خاطر اثر ثقلی بتن تازه در تراکم بهتر نواحی پائین تر و حرکت شیرابه بتن به سمت نواحی فوقانی باشد. همچنین این واقعیت توسط سایر محققین نیز مشاهده شده است [۲۸ و ۲۹ و ۳۰].

در نمودار ۱ توزیع فراوانی مقاومت فشاری ۱۳۵ نمونه استوانه قالب گیری شده را که دارای یک توزیع نسبتاً نرمال است نشان می‌دهد.

جدول ۴- تحلیل آماری داده‌ها (۱۳۵ نمونه قالب گیری شده)

ویژگی	واحد	حداکثر	حداقل	انحراف معیار	میانگین
C	%	۵۰/۷۵	۰/۶۱	۹/۶۰	۱۴/۹۴
A	%	۱۰/۱۱	۰/۳۵	۱/۹۶	۲/۹۹
R	-	۴۶/۲۰	۲۸/۸۲	۴/۰۰	۳۹/۱۴
P	Km/sec	۴/۶۴	۲/۸۰	۰/۴۰	۴/۱۷
S	mm	۴۵	۵/۵۰	۵/۹۶	۲۲/۷۶
f_c	Mpa	۴۶/۵۶	۳/۳۶	۹/۱۴	۲۴/۸۰



نمودار ۱- فراوانی مقاومت فشاری ۱۳۵ نمونه قالب گیری شده

دقت روابط پیشنهادی با استفاده از R^2 طبق تعریف رابطه ۴ بررسی شد.

$$R^2 = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \right) \quad (4)$$

که در آن n تعداد کل داده، x_i و y_i به ترتیب مقادیر پیش‌بینی شده و مقادیر واقعی و R^2 ضریب تخمین بین ۰ و ۱ می‌باشد. مقادیر R^2 نزدیک به ۱ بیانگر تناسب بیشتر بین نتایج رابطه پیشنهادی و نتایج واقعی و مقادیر R^2 نزدیک به ۰ بیانگر این است که رابطه پیشنهادی قابلیت تخمین بر اساس متغیرهای وابسته را ندارد.

۲-۵- رگرسیون

با استفاده از تحلیل رگرسیون روابطی بین ویژگی‌ها با مقاومت فشاری پیشنهاد شد. مدل‌های مختلف رگرسیون از جمله خطی، چند جمله‌ای، نمایی و توانی توسط سایر محققان برای برقراری رابطه بین نتایج آزمون‌های غیر مخرب و مقاومت فشاری پیشنهاد

جدول ۵- میانگین نتایج ۳۳ مجموعه نمونه

شماره مجموعه	f_c (MPa)	C (%)	A (%)	R -	P (km/s)	S (mm)
۱	۲۴/۴۰	۳/۳۹	۴/۴۳	۳۸/۰۹	۴/۳۲	۲۰/۴۹
۲	۱۵/۵۵	۲/۸۳	۳/۴۴	۳۴/۴۸	۴/۱۹	۲۰/۶۶
۳	۲۳/۹۸	۵/۱۵	۵/۹۰	۳۸/۴۷	۴/۳۴	۲۳/۶۷
۴	۴/۷۶	۱۰/۱	۳/۲۹	۲۹/۶۳	۲/۹۵	۲۵/۴۲
۵	۹/۸۲	۲۴/۱	۴/۱۰	۳۰/۷۰	۳/۲۱	۵/۸۳
۶	۲۰/۹۵	۲۰/۰	۳/۱۲	۳۵/۲۳	۳/۷۰	۷/۸۳
۷	۹/۱۷	۱۶/۳	۲/۷۶	۳۴/۳۷	۳/۳۰	۲۰/۳۳
۸	۲۰/۵۴	۷/۷۲	۲/۷۳	۳۸/۰۳	۴/۳۲	۲۳/۹۲
۹	۱۷/۹۷	۱۱/۱	۷/۷۹	۳۵/۶۷	۴/۱۰	۲۳/۲۵
۱۰	۲۱/۵۸	۲۷/۸	۰/۵۶	۴۱/۰۹	۴/۰۲	۲۳/۶۷
۱۱	۱۵/۷۹	۲۰/۷	۰/۷۰	۴۰/۲۱	۴/۰۵	۲۳/۳۳
۱۲	۲۵/۲۶	۱۵/۲	۱/۷۶	۳۷/۰۷	۴/۲۸	۲۳/۵۰
۱۳	۲۶/۰۶	۱۲/۶	۱/۹۸	۳۶/۲۸	۴/۲۲	۲۶/۱۷
۱۴	۲۸/۲۲	۱۶/۵	۱/۱۷	۴۱/۲۱	۴/۴۵	۲۵/۰۸
۱۵	۲۹/۵۱	۱۰/۲	۳/۷۳	۴۱/۲۵	۴/۴۴	۲۰/۹۲
۱۶	۳۲/۶۷	۲۱/۸	۱/۴۹	۴۱/۸۴	۴/۴۳	۳۱/۸۳
۱۷	۲۸/۸۱	۱۲/۳	۱/۹۲	۴۱/۴۰	۴/۴۴	۲۳/۰۰
۱۸	۲۸/۴۶	۱۹/۲	۱/۸۱	۴۴/۴۲	۴/۴۰	۲۰/۶۷
۱۹	۳۶/۲۰	۲۱/۹	۱/۷۳	۴۴/۵۹	۴/۴۴	۲۲/۰۰
۲۰	۳۲/۵۹	۲۰/۰	۱/۷۲	۴۴/۸۳	۴/۳۹	۲۲/۰۰
۲۱	۱۵/۴۹	۳۷/۹	۱/۴۶	۴۱/۸۴	۴/۱۵	۲۴/۳۳
۲۲	۳۳/۳۰	۱۲/۷	۳/۵۷	۳۹/۱۲	۴/۳۲	۲۳/۱۷
۲۳	۲۸/۶۷	۱۳/۲	۴/۱۴	۳۹/۹۴	۴/۳۳	۲۱/۶۷
۲۴	۴۳/۲۳	۴۲/۵	۱/۸۲	۴۵/۱۸	۴/۲۰	۱۷/۶۷
۲۵	۳۷/۰۵	۲۹/۰	۲/۴۲	۴۵/۱۸	۴/۲۲	۱۸/۳۳
۲۶	۳۹/۵۵	۱۸/۹	۱/۴۰	۴۱/۹۶	۴/۵۶	۲۳/۳۳
۲۷	۳۵/۲۴	۱۵/۷	۱/۸۳	۴۲/۰۶	۴/۵۷	۲۴/۸۳
۲۸	۲۱/۹۳	۹/۵۲	۳/۲۸	۳۵/۷۹	۴/۱۷	۲۷/۶۷
۲۹	۱۸/۱۷	۳/۰۳	۵/۸۹	۳۴/۳۲	۴/۱۷	۲۷/۸۳
۳۰	۲۲/۶۹	۱۷/۷	۱/۵۹	۴۰/۸۱	۴/۱۱	۲۶/۲۵
۳۱	۲۷/۹۶	۸/۹۵	۳/۱۳	۳۹/۶۹	۴/۳۹	۲۳/۴۶
۳۲	۳۵/۵۵	۱۱/۲	۳/۶۱	۴۱/۶۶	۴/۴۰	۲۷/۰۰
۳۳	۳۱/۷۶	۱۰/۳	۳/۹۸	۴۱/۶۵	۴/۳۶	۲۴/۰۰

جدول ۶- نتایج ۶ مغزه حفاری شده از نمونه‌های منشوری

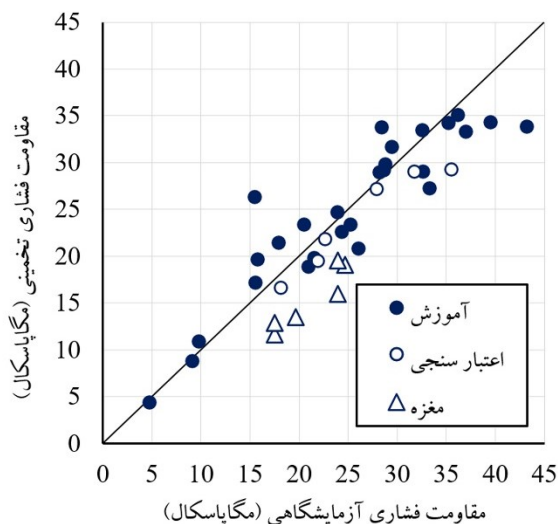
کد مغزه	S (mm)	P (km/s)	R	A (%)	C (%)	f_{core} (MPa)*
T1	۲۴/۷۷	۳/۸۰	۲۸/۸	۴/۲۴	۲۶/۱۶	۱۹/۶۷
M1	۲۸/۰۳	۳/۸۵	۳۷/۳	۲/۳۰	۱۹/۳۶	۲۳/۹۵
B1	۱۴/۹۰	۳/۹۱	۳۳/۵	۱/۹۲	۳۱/۹۹	۲۴/۶۷
T2	۲۴/۷۷	۳/۷۲	۲۸/۴	۲/۶۴	۲۶/۰۰	۱۷/۵۳
M2	۲۴/۷۸	۳/۷۷	۳۰/۵	۲/۷۳	۲۲/۵۱	۱۷/۵۳
B2	۲۰/۱۰	۳/۸۷	۳۸/۲	۶/۲۰	۱۴/۸۵	۲۳/۹۵
میانگین	۲۲/۸۹	۳/۸۲	۳۲/۸	۳/۳۴	۲۳/۴۸	۲۱/۲۲

* f_{core} مقاومت فشاری میانگین مغزه‌ها:

$$R^2 = 0.90 \text{ محاسبه نماید.}$$

$$f_c = 0.00293 \times C^{0.156} \times A^{0.11} \times R^{1.033} \times P^{3.86} \times S^{-0.268} \quad (V)$$

این روش ابداعی (رابطه ۷) علاوه بر اینکه با دقت بهتری نسبت به روش متداول SonReb (رابطه ۶) قادر به تخمین مقاومت فشاری نمونه های آموزشی و اعتبارسنجی است، توانست با دقت قابل قبولی $R^2 = 0.88$ مقاومت فشاری مغزه های حفاری شده را برآورد نماید. این موفقیت نشان داد که ترکیب پردازش تصویر ممکن است منجر به روابط پیش بینی مقاومت با قابلیت بیشتر در تعمیم پذیری به کاربردهای عملی شود. جدول ۷ دقت روابط ۶ و ۷ را نشان داده و همچنین در نمودار ۳ تناسب مقاومت فشاری آزمایشگاهی و مقاومت فشاری تعیین شده توسط رابطه ۷ را برای نمونه های آموزشی، اعتبارسنجی و مغزه ها به تصویر کشیده است.



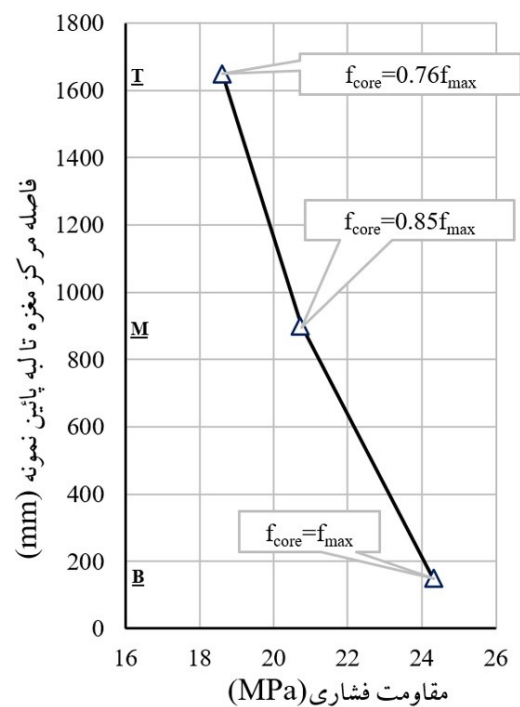
نمودار ۳- ارتباط مقاومت فشاری آزمایشگاهی و تخمینی با رابطه ۷ برای داده های آموزشی، اعتبارسنجی و مغزه ها

جدول ۷- دقت روابط پیشنهادی

ترکیب	شماره رابطه	ضریب تخمین (R^2)		
		مغزه	اعتبارسنجی	آموزش
R, P	۶	۰/۸۱	۰/۹۱	۰/۸۳
C, A, R, P, S	۷	۰/۸۸	۰/۹۴	۰/۹۰

۴- نتیجه گیری

یافته های این پژوهش برای رفع مشکل حساسیت روش های غیر مخرب به شرایط حین آزمایش برای تعیین مقاومت فشاری بتن یک روش بر مبنای ترکیب پردازش تصویر و آزمون های غیر



نمودار ۲- مقاومت فشاری میانگین مغزه ها (f_{core}) در ترازهای

مختلف نمونه های منشوری

از آنجا نتایج عدد بازتاب چکش اشमित وابستگی زیادی به مشخصات سطحی از جمله جنس قالب و پدیده کرناسیون دارد، نتایج چکش اشमित به تنهایی در کاربردهای عملی قابل اطمینان نیست [۳۱]. برای بهبود دقت می توان از ترکیب آزمون چکش اشमित و سرعت پالس اولتراسونیک استفاده کرد. رابطه ۶ با رگرسیون چندگانه متغیرهای R و P در قالب توانی پیشنهاد شد و قادر است با دقت $R^2 = 0.83$ مقاومت فشاری داده های آموزشی را تخمین بزند. این ترکیب که در مرور ادبیات گذشته SonReb نامگذاری شده در قالب های خطی [۲۱]، چند جمله ای [۸]، نمائی [۱۹] و توانی [۲۰، ۲۷] توسط سایر محققین نیز پیشنهاد شده است.

$$f_c = 0.00105 \times R^{1.662} \times P^{2.746} \quad (۶)$$

گرچه از پردازش تصویر مستقیماً برای تعیین حجم ماتریس سیمانی و حجم دقیق هوا در بتن سخت شده استفاده نشد، اما انتظار می رود که ویژگی های سطحی به دست آمده از پردازش تصویر ارتباط معناداری با مقاومت فشاری نمونه بتن داشته باشد. با ترکیب نتایج آزمون غیر مخرب و ویژگی های استخراج شده از پردازش تصویر رابطه ابداعی ۷ که آنرا CARPS نامیدیم، پیشنهاد شد که قادر است مقاومت فشاری مجموعه نمونه های آموزشی را با دقت

- [2] Hobbs B, Tchoketch Kebir M. Non-destructive testing techniques for the forensic engineering investigation of reinforced concrete buildings. *Forensic Sci. Int* 2007; 167 (2-3): 167-172. 10.1016/j.forsciint.2006.06.065
- [3] Domagala L., Marganska M., Miazgowiec M. (2024), "Moisture Impact on Static and Dynamic Modulus of Elasticity in Structural Normal-Weight Concretes", *Materials*, 17, 3722, <https://doi.org/10.3390/ma17153722>
- [4] Güçlüer K. (2020), "Investigation of the effects of aggregate textural properties on compressive strength (CS) and ultrasonic pulse velocity (UPV) of concrete", *Journal of Building Engineering*, 27, 100949, <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.100949>
- [5] Güneşli H., Karahan S., Güneşli A., "Water content and temperature effect on ultrasonic pulse velocity of concrete", *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 53, 159-166, <https://doi.org/10.1134/S1061830917020024>
- [6] Parihar H. S., Shanker R., Singh V., "Effect of variation of steel reinforcement on ultrasonic pulse velocity prediction in concrete beam", *Materials Today: Proceedings*, 65, 1486-1490, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.468>
- [7] Popovics S. A critique of the ultrasonic pulse velocity method for testing concrete. *NDT E Int* 1997; 30: 260 10.1016/s0963-8695(97)88958-x
- [8] Amini K, Jalalpour M, Delatte N. Advancing concrete strength prediction using non-destructive testing: Development and verification of a generalizable model. *Construction and Building Materials* 2016; 102: 762-768. 10.1016/j.conbuildmat.2015.10.131
- [9] Asteris P G, Mokos V G. Concrete compressive strength using artificial neural networks. *Neural Computing and Applications* 2019; 32: 11807-11826. 10.1007/s00521-019-04663-2
- [10] Rashid K, Waqas R. Compressive strength evaluation by non-destructive techniques: An automated approach in construction industry. *Journal of Building Engineering* 2017; 12: 147-154. 10.1016/j.jobbe.2017.05.010
- [11] 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* 2021; 14: 10.1016/j.cscm.2021.e00491
- [12] Lin Y C, Lin Y, Chan C. Use of ultrasonic pulse velocity to estimate strength of concrete at various ages. *Magazine of Concrete Research* 2016; 68(14):739-749. 10.1680/jmacr.15.00025
- [13] Shiuly A, Dutta D. Assessing compressive strengths of mortar and concrete from digital images

مخرب ارائه کرده است. اگرچه روش‌های پردازش تصویر به‌طور کلی دقت کمتری دارند، اما ویژگی‌هایی به دست می‌دهند که کمتر تحت تأثیر شرایط حین آزمایش قرار می‌گیرند. ترکیب دو آزمون غیرمخرب و پردازش تصویر نه تنها دقت خوبی نشان داد، بلکه نتایج آن قابلیت بیشتری نسبت به روش‌های رایج مانند SonReb در تخمین مقاومت بتن اعضای سازه‌ای داشت. مقاومت فشاری تخمینی با ترکیب سرعت موج اولتراسونیک، عدد چکش بازگشتی، نسبت حفره‌های هوا در سطح برش خورده، نسبت ماتریس سیمانی در سطح برش خورده و حداکثر اندازه سنگ‌دانه اندازه‌گیری شده در سطح برش خورده، که با نام CARPS معرفی شد، دقت بیشتری نسبت به سایر ترکیب‌ها داشت (مقادیر R^2 برای داده‌های اعتبارسنجی و آموزش به ترتیب ۰/۹۴ و ۰/۹۰). معادله پیشنهادی حاصل از رگرسیون، مقاومت فشاری مغزه‌های حفاری شده را با دقت R^2 برابر با ۰/۸۸ تخمین زد. این روش در تخمین مقاومت فشاری نمونه‌های اعتبارسنجی و مغزه‌ها دقت بیشتری نسبت به ترکیب SonReb نشان داد. با این رویکرد، می‌توان برآوردهای قابل‌اعتمادتر و دقیق‌تری از مقاومت فشاری بتن ارائه داد و بهبود فرایند ارزیابی را تضمین کرد. این امید ایجاد شد که با پژوهش‌های تکمیلی بتوان با کمک ترکیب پردازش تصویر و آزمون‌های غیرمخرب به روابط واحدی برای پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن در محل رسید.

همچنین در تحقیقات آتی می‌توان ویژگی‌های دیگری نظیر اندازه حفره‌های هوا، طول ناحیه انتقالی خمیر و سنگ‌دانه، و دانه‌بندی سنگ‌دانه‌ها را توسط پردازش تصویر سطح برش خورده استخراج و با بهره‌گیری از این ویژگی‌های اضافی روابطی پیشنهاد کرد که دقت ارزیابی مقاومت را بهبود بخشد و مسیر را برای پیشرفت‌های جدید در روش‌های ارزیابی بتن هموار کند. علاوه بر این، مجموعه‌ای از داده‌های آزمایشگاهی ارائه شده است که به‌عنوان یک منبع برای مطالعات آتی محسوب می‌شود.

۵- مراجع

- [1] Shariati M, Sulong H R, Arabnejad K. Assessing the strength of reinforced concrete structures through ultrasonic pulse velocity and schmidt rebound hammer test. *Scientific Research and Essays* 2011; 6(1): 213-220. 10.5897/SRE10.

- Engineering 2015; 2(4):54. 10.53555/nnmce.v2i4.337
- [25] Li M, Wang J, Guo Z, Chen J, Zhao Z, Ren J. Evaluation of the Adhesion between Aggregate and Asphalt Binder Based on Image Processing Techniques Considering Aggregate Characteristics. Materials 2023; 16(14):5097. 10.3390/ma16145097
- [26] Gorospe K, Booya E, Ghaednia H, Das S. Strength, Durability, and Thermal Properties of Glass Aggregate Mortars. Journal of Materials in Civil Engineering 2019; 31(10):04019231. 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002884
- [27] Breysse D. Nondestructive Evaluation of Concrete Strength: An Historical Review and a New Perspective by Combining NDT Methods. Construction and Building Materials 2012; 33, 139–163. 10.1016/j.conbuildmat.2011.12.103
- [28] Qasrawi H. Effect of the position of core on the strength of concrete of columns in existing structures. Journal of Building Engineering 2019; 25: 100812. 10.1016/j.jobe.2019.100812
- [29] Frappa G, Miceli M, Pauletta M. Destructive and non-destructive tests on columns and cube specimens made with the same concrete mix. Construction and Building Materials 2022; 349: 128807. 10.1016/j.conbuildmat.2022.128807
- [30] 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. 10.1016/S0958-9465(00)00053-6
- [31] Kim J, Kim C, Yi S, Lee Y. Effect of carbonation on the rebound number and compressive strength of concrete. Cement & Concrete Composites 2009; 31: 139–144. 10.1016/j.cemconcomp.2008.10.001.
- by machine learning techniques. Frontiers of Structural and Civil Engineering 2022; 10.1007/s11709-022-0819-z
- [14] Jang Y, Ahn Y, Kim H Y. Estimating Compressive Strength of Concrete Using Deep Convolutional Neural Networks with Digital Microscope Images. Journal of Computing in Civil Engineering 2019; 33:3. 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.000008
- [15] Basyigit C, Comak B, Kilincarslan S, Uncu I S. Assessment of concrete compressive strength by image processing technique. Construction and Building Materials 2012; 37: 526-532. 10.1016/j.conbuildmat.2012.07.055
- [16] Dogan G, Arslan M H, Ceylan M. Concrete compressive strength detection using image processing based new test method. Measurement 2017; 109: 137-148. 10.1016/j.measurement.2017.05.051
- [17] Waris M I, Plevris V, Mir J, Chairman N, Ahmad A. An alternative approach for measuring the mechanical properties of hybrid concrete through image processing and machine learning. Construction and Building Materials 2022; 328: 126899. 10.1016/j.conbuildmat.2022.126899
- [18] Dogan G, Ozkis A, Arslan M H. A New Methodology Based on Artificial Intelligence for Estimating the Compressive Strength of Concrete from Surface Images. Ingeniería e Investigación 2024; 44: 1. 10.15446/ing.investig.99526
- [19] Logothetis L A. Combination of three non-destructive methods for the determination of the strength of concrete, Ph.D. thesis, Athens, Greece, 1978.
- [20] Kheder G.F. A two stage procedure for assessment of in situ concrete strength using combined non-destructive testing. Mater. Struct. 1999; 32, 410. 10.1007/BF02482712.
- [21] Erdal M, Prediction of the compressive strength of vacuum processed concretes using artificial neural network and regression techniques. Scientific Research and Essays 2009; 4(10):1057–1065 .
- [22] ASTM International. Standard test method for rebound number of hardened concrete. ASTM C805 2018. 10.1520/C0805_C0805M-18A
- [23] ASTM International. Standard test method for ultrasonic pulse velocity through concrete. ASTM C597 2022. 10.1520/C0597-22
- [24] Khan A, Hashim M, Khan M, Atif Shamim M. An image processing approach to coarse aggregate feature extraction in hardened concrete. Journal of Advance Research in Mechanical and Civil

Evaluation of Concrete Compressive Strength by Integrating Non-Destructive Methods and Image Processing

Hassan Araghi *

Ph.D Candidate, Department of Civil Engineering, International Campus, Guilan University, Rasht, Iran.

Rahmat Madndoust

Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Technology, Guilan University, Rasht, Iran.

Meysam Effati

Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Technology, Guilan University, Rasht, Iran.

Abstract

Non-destructive testing (NDT) methods for estimating in-situ concrete compressive strength (f'_c) are typically performed using ultrasonic pulse velocity tests, rebound hammer tests, or a combination of both (SonReb). Since the accuracy of these methods is affected by the condition of the concrete, digital image processing (DIP) techniques have been proposed as alternatives with reduced sensitivity to these conditions. In this study, an approach based on integrating NDT and DIP results was employed to establish a reliable and generalizable relationship for estimating f'_c . To this end, 135 standard cylindrical specimens were cast, and in addition to performing compressive and NDT tests, several features were extracted from their saw-cut surfaces using DIP. The resulting data were then used to train and validate a regression model for estimating f'_c . Furthermore, similar tests were conducted on cores with a 95- mm diameter, drilled from three levels of two specimens (each measuring 1800×300×300 mm), in order to assess the applicability of the proposed equations in estimating the concrete strength of structural members. The findings demonstrated that the combination of NDT and DIP outperformed the SonReb model in estimating f'_c , yielding R^2 values of 0.90 and 0.94 for the training and validation datasets, respectively, compared to 0.83 and 0.91 for SonReb. Additionally, the proposed model estimated the f'_c values of cores extracted from columns with an R^2 of 0.88, whereas the SonReb model achieved an R^2 of 0.81.

Keywords: Concrete Strength Assessment, Image Processing, Non-Destructive Tests, Rebound Hammer Number, Ultrasonic Pulse Velocity.

* Corresponding Author: hassanaraghi@webmail.guilan.ac.ir

