

مدل رفتاری برای تخمین مقاومت بتن با استفاده از امواج فراصوت با در نظر گرفتن نسبت‌های اختلاط مصالح

مهدی صباغ^{۱*}، محمدتقی کاظمی^۲، منصور عسگری^۳

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۰۲/۱۱	<p>ارزیابی مقاومت بتن، یکی از مسائل مهم در صنعت بتن و سازه‌های بتنی است. در بیشتر موارد نمونه‌هایی تهیه شده از بتن در حین اجرا جدا شده، پس از عمل‌آوری طبق استانداردهای موجود تحت فشار تک‌محوره قرار می‌گیرند و بر اساس نیروی اعمالی، مقاومت بتن در سازه تعیین می‌شود. مقاومت حداقل بتن را می‌توان پیش‌بینی کرد و با دقتی مناسب تخمین زد؛ اما در موارد بسیاری به دلایلی چون عدم اجرای صحیح، مقاومت بتن سازه با بتن طرح متفاوت است. از جمله روش‌های پذیرفته‌شده برای اندازه‌گیری مقاومت بتن در محل، می‌توان به روش مغزه‌گیری اشاره کرد که روشی مخرب است. ارائه روشی غیرمخرب که بتواند مقاومت بتن را در سازه تخمین بزند، در موارد زیادی راهگشا خواهد بود. در این پژوهش با تهیه نمونه‌هایی بتنی با طرح اختلاط متفاوت ضمن بررسی تأثیر نسبت‌های اختلاط بر مقاومت بتن و سرعت موج فراصوت، رابطه‌ای بین مقاومت بتن و سرعت موج فراصوت ارائه شده است. همچنین با در نظر گرفتن نسبت آب به سیمان و نسبت سنگدانه ریز به درشت، رابطه‌ای جامع برای تخمین مقاومت بتن ارائه گردیده است.</p>
پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۶/۱۲	
<p>واژگان کلیدی: بتن، مقاومت فشاری، سرعت امواج فراصوت، آزمون‌های غیرمخرب، طرح اختلاط.</p>	

۱- مقدمه

تولید امواج فراصوت به کار می‌رود [۱] (شکل (۱)).
بیش از ۶۰ سال است که روش سرعت موج فراصوت برای ارزیابی بتن کاربرد دارد [۲]. امروزه آزمون فراصوت یکی از پرکاربردترین روش‌های غیرمخرب است که توانایی کنترل کیفیت قطعات صنعتی را به سرعت و هم‌زمان با انجام آزمون دارد [۳]. روش سرعت موج فراصوت، روشی بر پایه انتشار موج تنش است که شامل اندازه‌گیری زمان عبور موج فراصوت از یک طول مشخص است. موج فراصوت توسط یک ترانسدیوسر پیزوالکتریکی، تولید و پس از عبور از طول مشخص توسط یک ترانسدیوسر پیزوالکتریکی دیگر آشکار می‌شود. برای تعیین سرعت امواج فراصوت، دو مبدل تولیدکننده و دریافت‌کننده ارتعاشات فراصوت طولی در دو طرف نمونه، روی سطح بتن قرار داده می‌شود. پس از عبور

روش‌های تولید و اندازه‌گیری امواج فراصوت با کشف پدیده مهم پیزوالکتریک ممکن شده است. کشف مذکور در سال ۱۸۸۰ توسط برادران کوری انجام شد. آن‌ها اعلام کردند که ورقه‌های کوچکی از برخی کریستال‌ها، در اثر اعمال فشار مکانیکی، ایجاد یک پتانسیل الکتریکی می‌کنند. یک سال بعد لیپمن پدیده معکوس پیزوالکتریک را بیان کرد؛ بدین معنی که با اعمال پتانسیل الکتریکی، کریستال‌های مذکور تغییر شکل می‌دهند. همچنین او دریافت که با اعمال پتانسیل الکتریکی مناسب می‌توان این کریستال‌ها را به نوسان درآورد یا برعکس با نوسان کریستال می‌توان سیگنال‌های الکتریکی مناسبی دریافت کرد. پدیده پیزوالکتریک در شناسایی و پدیده معکوس پیزوالکتریک در

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: Sabagh@ut.ac.ir

۱. کارشناسی‌ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

۲. دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

۳. دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد

آن و ایجاد مدلی که قادر باشد رفتار بتن را بیان کند، مشکل است [۷]. اجزای اصلی بتن، خمیر سیمان هیدراته شده، سنگدانه، آب و هوا است. خمیر سیمان هیدراته شده ماده‌ای پیچیده و متشکل از چندین فاز است. سنگدانه‌ها نیز مصالحی مرکب و متخلخل و بسیار متفاوت با خمیر سیمان احاطه‌کننده آنان است. ارتباط بین خمیر سیمان و سنگدانه نیز مسئله‌ای پیچیده است. در این پژوهش، بتن به صورت یک ماده مرکب و همگن در نظر گرفته شده است. مقاومت فشاری بتن از عوامل مؤثر بر ظرفیت باربری المان‌های سازه‌های بتنی به‌ویژه ستون‌ها است؛ هرچند میزان این تأثیر موارد مختلف، متفاوت است [۸]. در حال حاضر هیچ ارتباط تئوری بین مقاومت فشاری بتن و سرعت امواج فراصوت در بتن بیان نشده است. در یک محیط ارتجاعی سرعت موج طولی تابعی است از مدول الاستیسیته دینامیکی (E_d)، جرم مخصوص (ρ) و ضریب پواسون (ν) و رابطه آن به صورت رابطه (۲) بیان می‌شود [۹]:

$$V_p = \sqrt{\frac{E_d(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (2)$$

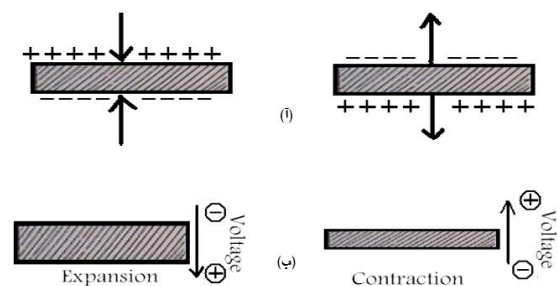
به کاربردن این رابطه، دستیابی به دیگر خصوصیات فیزیکی بتن از جمله مقاومت را به‌وسیلهٔ آزمون امواج فراصوت ممکن می‌سازد.

تلاش‌های زیادی برای تخمین مقاومت بتن به‌وسیلهٔ آزمون‌های امواج فراصوت صورت گرفته که برخی از آن‌ها نتایج مثبتی را به همراه داشته است [۱۸-۱۰]. پوپویوکس و همکارانش تحقیقات زیادی در زمینهٔ تخمین مقاومت بتن به روش‌های غیرمخرب به‌خصوص ارزیابی مقاومت بتن با آزمون امواج فراصوت انجام داده‌اند. این تحقیقات منجر به ارائه روابط و مدل‌های تجربی نیز شده است. آن‌ها روابط ارائه‌شده در استانداردهای مختلف را بررسی کردند. در قسمتی از این پژوهش‌ها رابطه‌ای برای تخمین مقاومت بتن توسط آزمون امواج فراصوت استفاده شده است که می‌تواند تخمین مناسبی را ارائه دهد. آن‌ها همچنین بیان کردند که عوامل مختلفی از جمله ویژگی‌های مصالح و نسبت‌های اختلاط می‌تواند بر ارتباط سرعت موج فراصوت و مقاومت بتن تأثیرگذار باشد. برای استفادهٔ کاربردی از آزمون امواج فراصوت در تخمین مقاومت بتن باید تأثیر این پارامترها را نیز در نظر گرفت [۱۹-۱۶]. در این زمینه تحقیقات دیگری نیز انجام شده است. برخی از آن‌ها در

پالس از طول معین، ارتعاشات پالس توسط مبدل ثانویه (گیرنده) به علامت‌های الکتریکی تبدیل می‌شود. مدار الکتریکی دستگاه قادر است زمان عبور پالس را اندازه‌گیری کند. سرعت پالس از رابطه (۱) به دست می‌آید:

$$V = \frac{L}{T} \quad (1)$$

که در آن، L طول مسیر عبور موج، T زمان عبور موج و V سرعت عبور پالس است.



شکل ۱: آ- پدیدهٔ پیزوالکتریک، ب- پدیدهٔ معکوس پیزوالکتریک

کنترل کیفیت سازه‌های بتنی، مهندسان و دانشمندان را بر آن داشته تا در جست‌وجوی راه‌های سنجش خواص مکانیکی بتن، به‌ویژه مقاومت باشند و در این زمینه، روش‌های غیرمخرب به دلیل حفظ عملکرد و سلامت سازه موجود، بیشتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. آزمون امواج فراصوت به دلیل دقت، سهولت، سرعت و عدم نیاز به مواد مصرفی، از پرکاربردترین روش‌های غیرمخرب کنترل کیفیت بتن است. مبنای این روش زمان عبور موج از سریع‌ترین موج بین دو مبدل می‌تواند بیانگر خواص فیزیکی محیط مسیر است که به کمک آن سرعت موج محاسبه می‌شود. زمان عبور انتشار موج باشد. سرعت موج با کاهش سختی بتن کاهش می‌یابد و بر همین اساس می‌توان ناهمگنی بتن یا وجود خرابی‌هایی مثل ترک، تورق، پوکی، تخلخل و کرمو بودن بتن را تشخیص داد. سرعت موج فراصوت به‌عنوان آزمونی غیرمخرب در تخمین مقاومت بتن نیز توسط مهندسان و محققان استفاده شده است. در این زمینه بسیاری از کمیته‌های بین‌المللی، ویژگی‌ها و استانداردهایی را برای ارزیابی بتن به روش سرعت پالس فراصوت تنظیم کرده‌اند [۴-۶].

۲- تاریخچه، فرضیات و تئوری مورد استفاده

مصالح تشکیل‌دهندهٔ بتن بسیار متنوع‌اند و تخمین مقاومت

Tester ساخت Toni Thechnik با دقت یک میکروثانیه برای اندازه‌گیری زمان عبور موج و محاسبه سرعت موج طولی استفاده شد. همچنین بارگذاری محوری توسط یک جک بتن‌شکن دیجیتالی انجام گرفت. پیش از بارگذاری محوری، با قرار دادن مبدل‌های دستگاه آزمون فراصوت در دو طرف نمونه‌های مکعبی، زمان عبور موج قرائت شد. برای عملکرد بهتر دستگاه آزمون فراصوت، از روغن وازلین به عنوان ماده واسط استفاده شد. نمونه‌های مکعبی ۲۸ روزه تا گسیختگی نهایی تحت فشار تک‌محوره قرار گرفتند و تنش مقاوم نمونه‌های مکعبی محاسبه گردید. یک گیج اندازه‌گیری جابه‌جایی با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر برای اندازه‌گیری تغییر شکل نمونه‌ها و محاسبه کرنش‌های محوری حین بارگذاری مورد استفاده قرار گرفت (شکل (۲)). شکل (۳) نمودار تنش - کرنش مربوط به نمونه‌های با طرح اختلاط D09 را نشان می‌دهد.



شکل ۲: اندازه‌گیری تغییر شکل‌های محوری و جانبی هم‌زمان با عبور موج در نمونه بتن تحت فشار تک‌محوره

۴- نتایج

برای تحلیل نتایج آزمایش‌ها از نرم‌افزارهای Microsoft Excel و IBM SPSS Statistics استفاده شد [۲۶]. چنان‌که پیش‌بینی می‌شد، با افزایش نسبت آب به سیمان،

جهت تخمین مقاومت انواع بتن، مثل بتن سبک و بتن غلتکی با استفاده از آزمون امواج فراصوت یا ترکیب این آزمون با سایر روش‌های غیرمخرب دیگر کوشیده‌اند. در تعدادی از این پژوهش‌ها، این ارتباط در بتن‌های حاوی افزودنی‌های پوزولانی، خاکستریادی و سرباره آهن‌گذاری نیز مشاهده شده است [۲۵-۲۰].

با همه این تلاش‌ها به دلیل پیچیدگی‌های مصالح بتن، موج تولیدی و سازه‌های پیش رو، هنوز هیچ روش کاملاً قابل‌قبولی برای تخمین مقاومت بتن وجود ندارد. بنابراین تحقیقات برای توسعه ارتباطی قابل قبول بین سرعت پالس فراصوت و مقاومت بتن ادامه دارد. در این پژوهش با تهیه نمونه‌هایی بتنی با طرح اختلاط متفاوت، رابطه‌ای بین مقاومت بتن و سرعت موج فراصوت بیان شده است. همچنین با در نظر گرفتن نسبت آب به سیمان و نسبت سنگدانه ریز به درشت، رابطه‌ای جامع برای تخمین مقاومت ارائه شده است.

۳- فعالیت‌های آزمایشگاهی

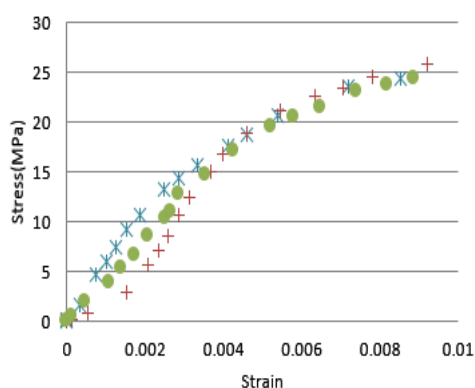
۳-۱- نمونه‌های تهیه‌شده

برای بررسی آزمایشگاهی، ۶۰ نمونه مکعبی با ابعاد ۱۵ سانتی‌متر با ۲۰ طرح اختلاط متفاوت آماده شدند. در این نمونه‌ها نسبت آب به سیمان برابر ۰/۴، ۰/۵، ۰/۶ و ۰/۷ و نسبت سنگدانه ریز به سنگدانه درشت در نمونه‌های مختلف برابر با $\frac{1}{5}$ ، $\frac{1}{2}$ ، $\frac{1}{1}$ ، $\frac{2}{1}$ و $\frac{5}{1}$ است. طرح اختلاط نمونه‌های مختلف در جدول ۱ آمده است که W بیانگر وزن آب، C وزن سیمان، S وزن سنگدانه ریز (ماسه) و G وزن سنگدانه درشت (شن) در هر متر مکعب نمونه بتن است. نمونه‌ها بعد از ۲۴ ساعت از قالب خارج شده، پس از آن تا ۲۸ روز به صورت غوطه‌ور در حوضچه آب نگهداری شدند. پس از آن توسط دستگاه اعمال فشار تک‌محوره تا شکست نهایی تحت فشار قرار گرفتند. از میان ۶۰ نمونه تهیه‌شده، ۶ نمونه به دلیل مشکلاتی که در جریان ساخت، عمل‌آوری و بارگذاری برای آن‌ها پیش آمد، حذف شدند. پیش از اعمال فشار بر نمونه‌ها، زمان عبور موج فراصوت از داخل نمونه‌ها اندازه‌گیری شد و با توجه به ابعاد نمونه‌ها سرعت عبور موج فراصوت در آن‌ها به دست آمد.

۳-۲- فرایند آزمایش‌ها

در این پژوهش از یک دستگاه آزمون فراصوت Concrete

مربوط به سرعت موج است که در آن ضریب همبستگی برابر با $0/635$ و $p < 0/001$ است و بیانگر رابطه معنی‌دار قوی میان سرعت موج فراصوت و مقاومت است. در سایر موارد نیز پارامترهای نسبت آب به سیمان و نسبت سنگدانه ریز به درشت، رابطه‌ای معنی‌دار با مقاومت بتن دارد.



شکل ۳: نمودار تنش کرنش نمونه D09

مقاومت نمونه‌های بتنی مکعبی و همچنین سرعت عبور موج طولی در آن‌ها افزایش یافت. همچنین تحلیل‌های اولیه و بررسی نمودارها، وجود ارتباط بین سرعت موج فراصوت و مقاومت نمونه‌های مکعبی را نشان می‌دهد. شکل (۴) مقاومت نمونه مکعبی به‌ازای سرعت موج فراصوت در تمامی نمونه‌ها را نشان می‌دهد. برای بررسی بهتر رابطه بین پارامترهای مختلف سنجش معنی‌داری این روابط به‌وسیله نرم‌افزار SPSS تحلیل همبستگی دوجانبه بر اساس ضریب همبستگی پیرسون بین هر زوج از پارامترها انجام شد. جدول ۲ قسمتی از خروجی نرم‌افزار SPSS است که همبستگی پارامترهای مقاومت نمونه مکعبی، سرعت موج فراصوت، نسبت آب به سیمان و دانه‌بندی را نشان می‌دهد. در این جدول، پارامترهایی که ارتباط معنی‌داری بین آن‌ها وجود دارد با ** مشخص شده‌اند. چنان‌که در این جدول مشاهده می‌کنید، بیشترین همبستگی با مقاومت بتن

جدول ۱: طرح اختلاط نمونه‌های مورد آزمایش

G(kg/m ³)	S(kg/m ³)	C(kg/m ³)	W(kg/m ³)	S/G	W/C	نمونه
۳۰۰	۱۵۰۰	۲۸۵	۲۰۰	۵/۱	۰/۷	D01
۶۰۰	۱۲۰۰	۲۸۵	۲۰۰	۲/۱	۰/۷	D02
۹۰۰	۹۰۰	۲۸۵	۲۰۰	۱/۱	۰/۷	D03
۱۲۰۰	۶۰۰	۲۸۵	۲۰۰	۱/۲	۰/۷	D04
۱۵۰۰	۳۰۰	۲۸۵	۲۰۰	۱/۵	۰/۷	D05
۳۰۰	۱۵۰۰	۳۳۳	۲۰۰	۵/۱	۰/۶	D06
۶۰۰	۱۲۰۰	۳۳۳	۲۰۰	۲/۱	۰/۶	D07
۹۰۰	۹۰۰	۳۳۳	۲۰۰	۱/۱	۰/۶	D08
۱۲۰۰	۶۰۰	۳۳۳	۲۰۰	۱/۲	۰/۶	D09
۱۵۰۰	۳۰۰	۳۳۳	۲۰۰	۱/۵	۰/۶	D10
۳۰۰	۱۵۰۰	۴۰۰	۲۰۰	۵/۱	۰/۵	D11
۶۰۰	۱۲۰۰	۴۰۰	۲۰۰	۲/۱	۰/۵	D12
۹۰۰	۹۰۰	۴۰۰	۲۰۰	۱/۱	۰/۵	D13
۱۲۰۰	۶۰۰	۴۰۰	۲۰۰	۱/۲	۰/۵	D14
۱۵۰۰	۳۰۰	۴۰۰	۲۰۰	۱/۵	۰/۵	D15
۳۰۰	۱۵۰۰	۵۰۰	۲۰۰	۵/۱	۰/۴	D16
۶۰۰	۱۲۰۰	۵۰۰	۲۰۰	۲/۱	۰/۴	D17
۹۰۰	۹۰۰	۵۰۰	۲۰۰	۱/۱	۰/۴	D18
۱۲۰۰	۶۰۰	۵۰۰	۲۰۰	۱/۲	۰/۴	D19
۱۵۰۰	۳۰۰	۵۰۰	۲۰۰	۱/۵	۰/۴	D20

جدول ۲: تحلیل همبستگی مقاومت نمونه مکعبی، سرعت موج فراصوت، نسبت آب به سیمان و دانه بندی

$\frac{S}{G}$	$\frac{W}{C}$	V	P_{max}		
-۰/۵۲۴**	-۰/۴۶۳**	۰/۶۳۵**	۱	ضریب همبستگی پیرسون	P_{max}
۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰		آزمون دو دامنه	
-۰/۶۱۳**	۰/۰۵۱	۱	۰/۶۳۵**	ضریب همبستگی پیرسون	V
۰/۰۰۰	۰/۷۱۴		۰/۰۰۰	آزمون دو دامنه	
-۰/۰۰۲	۱	۰/۰۵۱	-۰/۴۶۳**	ضریب همبستگی پیرسون	$\frac{W}{C}$
۰/۹۹۰		۰/۷۱۴	۰/۰۰۰	آزمون دو دامنه	
۱	-۰/۰۰۲	-۰/۶۱۳**	-۰/۵۲۴**	ضریب همبستگی پیرسون	$\frac{S}{G}$
	۰/۹۹۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	آزمون دو دامنه	

** طبق آزمون دو دامنه سطح معنی داری رابطه ۰/۰۰۱ است.

جدول ۳: ضرایب a_1 و a_2 تخمین زده شده توسط نرم افزار SPSS

فاصله اطمینان ۹۵٪		خطای استاندارد	مقدار تخمینی	پارامتر
کران بالا	کران پایین			
۲/۰۰۴	-۰/۱۶۱	۰/۵۴۰	۰/۹۲۱۵	a_0
۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰۷۷۷	a_1

جدول ۴: آنالیز واریانس رابطه مقاومت فشاری نمونه مکعبی نسبت به سرعت موج فراصوت در نمونه‌ها

متوسط مربعات	درجه آزادی	مجموع مربعات	منبع
۲۱۲۱۶	۲	۴۲۴۳۳	رگرسیون
۳۳/۶۵	۵۲	۱۷۵۰	باقیمانده
	۵۴	۴۴۱۸۳	تصحیح نشده
	۵۳	۳۰۱۵	تصحیح شده

متغیر وابسته: P_{max}

$$R^2 = 0.42 = (\text{تصحیح شده مجموع مربعات}) / (\text{مجموع مربعات باقیمانده‌ها}) - 1$$

جدول ۵: ضرایب a_0 ، a_1 ، a_2 و a_3 تخمین زده شده توسط نرم افزار SPSS

فاصله اطمینان ۹۵٪		خطای استاندارد	مقدار تخمینی	پارامتر
کران بالا	کران پایین			
۱۶/۱۶۶	۲/۱۶۲	۳/۴۸۶	۹/۱۶۴	a_0
۰/۰۰۱	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰۳۷۴	a_1
-۲۲/۰۴۰	-۴۴/۳۰۲	۵/۵۴۲	-۳۳/۱۷۱	a_2
۰/۰۹۳	-۱/۷۴۲	۰/۴۵۷	-۰/۸۲۴	a_3

جدول ۶: آنالیز واریانس رابطه مقاومت فشاری نمونه مکعبی نسبت به سرعت موج فراصوت در نمونه‌ها

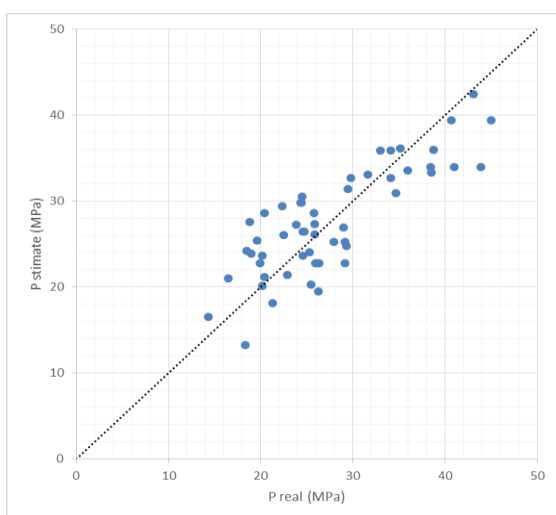
متوسط مربعات	درجه آزادی	مجموع مربعات	منبع
۱۰۸۰۰	۴	۴۳۲۰۱	رگرسیون
۱۹/۶۳۲	۵۰	۹۸۱/۶	باقیمانده
	۵۴	۴۴۱۸۳	تصحیح نشده
	۵۳	۳۰۱۵	تصحیح شده

متغیر وابسته: P_{max}

همان چیزی است که محققان قبلی نیز بیان کرده‌اند [۱۷]. این ارتباط به صورت $P_{max} = a_0 e^{a_1 V}$ تعریف شد که در این رابطه، V سرعت موج فراصوت برحسب m/s و P_{max} مقاومت فشاری نمونه مکعبی برحسب MPa است و a_0 و a_1 ضرایب ثابتی هستند که با بررسی رفتار نمونه‌ها و حداقل کردن مجموع مربعات باقیمانده‌ها در ادامه به دست آمده‌اند. جدول ۳ قسمتی از خروجی نرم‌افزار SPSS است که مقادیر به دست آمده برای a_0 و a_1 را نشان می‌دهد. جدول ۴ نیز نتایج آنالیز واریانس این تحلیل را بیان می‌کند. چنان‌که در جدول فوق مشاهده می‌کنید، مقادیر ثابت‌ها برابر با $a_0 = 0.922$ و $a_1 = 0.000777$ به دست آمدند؛ پس رابطه مقاومت فشاری نمونه مکعبی با سرعت موج طولی بدون توجه به سایر پارامترهای آن به صورت زیر است:

$$P_{max} = 0.922e^{0.000777V}, \quad R^2 = 0.420 \quad (3)$$

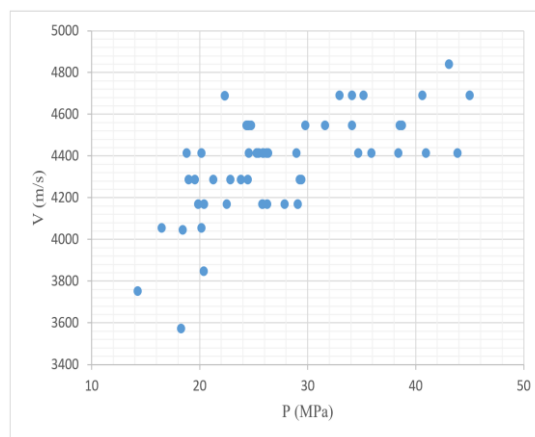
که در این رابطه، V سرعت موج فراصوت برحسب m/s و P_{max} مقاومت فشاری نمونه مکعبی برحسب MPa است. شکل (۵) میزان برابری مقاومت تخمینی رابطه (۳) را در برابر مقاومت اندازه‌گیری شده در نمونه‌ها نشان می‌دهد.



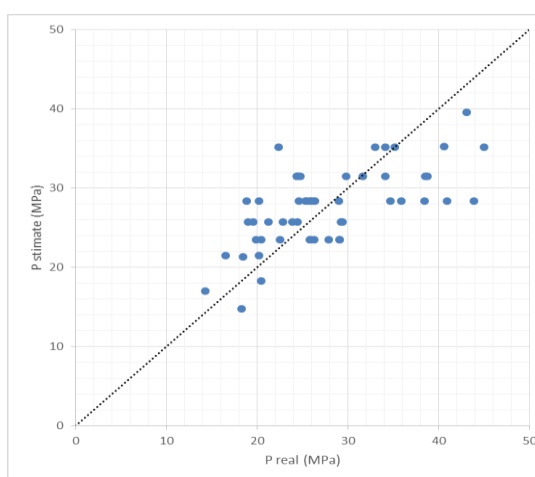
شکل ۶: میزان برابری مقاومت تخمینی بر اساس رابطه (۴) و مقادیر اندازه‌گیری شده در نمونه‌ها

۴-۲- ارائه مدل رفتاری برای ارتباط مقاومت با سرعت موج فراصوت با در نظر گرفتن طرح اختلاط بتن

رابطه ارائه‌شده در قسمت قبلی، تا حدودی می‌تواند در تخمین مقاومت بتن کارا باشد؛ اما در بعضی موارد ممکن



شکل ۴: مقاومت نمونه مکعبی به‌ازای سرعت موج فراصوت در تمامی نمونه‌ها



شکل ۵: میزان برابری مقاومت تخمینی بر اساس رابطه (۳) و مقادیر اندازه‌گیری شده در نمونه‌ها

۴-۱- ارائه مدل رفتاری برای ارتباط مقاومت با سرعت موج فراصوت

همان‌طور که پیش از این نیز بیان شد، بر اساس نتایج آزمون‌ها، مقاومت فشاری نمونه مکعبی با همه پارامترهای سرعت موج فراصوت، نسبت آب به سیمان و نسبت ماسه به شن، ارتباطی معنادار دارد و به‌طور معمول با افزایش مقاومت بتن، سرعت موج فراصوت در نمونه افزایش می‌یابد. برای دستیابی به این رابطه، با بررسی ادبیات فنی و مطالعه اولیه نتایج آزمایش‌ها تلاش کردیم بدون توجه به سایر پارامترها با برازش یک منحنی با حداقل مجموع مربعات باقیمانده‌ها ارتباطی بین مقاومت فشاری نمونه مکعبی و سرعت موج فراصوت به دست آوردیم. برای این کار با بررسی نمودارهای مختلف و مطالعه ادبیات فنی به این نتیجه رسیدیم که رابطه نمایی، رابطه ساده‌ای است که به نحوی مناسب این رفتار را توصیف می‌کند و این مطابق

برحسب MPa. شکل (۶) مقاومت تخمینی رابطه ۴ را در برابر مقاومت اندازه‌گیری شده در نمونه‌ها نشان می‌دهد. علاوه بر ضریب R^2 که رابطه (۴) را قوی‌تر از رابطه (۳) معرفی می‌کند، مقایسه شکل‌های (۵) و (۶) نیز میزان برابری بیشتری بین مقدار تخمینی از رابطه (۴) با مقدار اندازه‌گیری شده در نمونه‌ها نشان می‌دهد.

۵- نتیجه‌گیری

بررسی آزمایشگاهی نمونه‌های بتنی، بیانگر وجود ارتباط قوی بین سرعت موج فراصوت و مقاومت بتن است؛ هرچند هیچ رابطه تئوری قطعی برای آن بیان نشده است. این ارتباط به نحوی است که به طور معمول با افزایش مقاومت، سرعت موج در بتن افزایش می‌یابد. با بررسی نمودارهای مختلف و ادبیات فنی، در این پژوهش این ارتباط به صورت نمایی بیان شد که همسو با پژوهش‌های پیشین است. بررسی پارامترهای مختلف نشان می‌دهد، پارامترهای دیگری نیز در این ارتباط مؤثرند که نسبت‌های اختلاط مصالح از مهم‌ترین آن‌ها است. بنابراین در این مقاله علاوه بر ارائه این رابطه، مدلی جامع‌تر نیز برای تخمین مقاومت بتن ارائه شده است. در این مدل، طرح اختلاط بتن نیز وارد شده است؛ یعنی در کنار در نظر گرفتن رابطه مقاومت بتن با سرعت موج طولی به صورت نمایی، ویژگی‌های مصالح بتن شامل نسبت آب به سیمان و نسبت سنگدانه ریز به سنگدانه درشت، به صورت خطی وارد معادله شده‌اند که با وجود سادگی، به خوبی این ارتباط را نشان می‌دهد. این مدل‌ها می‌تواند در سطحی وسیع برای تخمین مقاومت اجزای سازه‌ای و حتی ترسیم کانتور مقاومت بتن در قسمت‌های مختلف سازه مورد استفاده قرار گیرد.

۶- تقدیر و تشکر

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از بخش آزمایشگاه مصالح ساختمانی دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شریف برای تأمین تجهیزات و همکاری در انجام این پژوهش قدردانی و تشکر کنند.

است نیاز به تخمینی دقیق‌تر و صحیح‌تر از مقاومت بتن داشته باشیم. همچنان که پیش‌تر از نتایج تحلیل همبستگی پارامترها بیان شد، نسبت‌های اختلاط مصالح نیز بر رابطه سرعت موج و مقاومت بتن مؤثر است؛ بنابراین در مدلی دیگر برای رفتار بتن تلاش شد تا عواملی دیگر نظیر نسبت آب به سیمان و دانه‌بندی که مشخص‌کننده اجزای تشکیل‌دهنده بتن هستند نیز دخیل شوند. در این مدل ارتباط مقاومت فشاری نمونه مکعبی با سرعت موج به صورت نمایی در نظر گرفته شد. با بررسی پارامترهای دیگر، شامل نسبت آب به سیمان و نسبت ماسه به شن و رسم نمودارهای مختلف و مقایسه همخوانی منحنی رسم‌شده با نتایج آزمایش‌ها به این نتیجه رسیدیم که در نظر گرفتن آن پارامترها در کنار سرعت موج طولی به صورت رابطه خطی علاوه بر ساده بودن، دارای دقت قابل قبولی خواهد بود. بنابراین این مدل به صورت

$$P_{\max} = a_0 e^{a_1 V} + a_2 \left(\frac{W}{C} \right) + a_3 \left(\frac{S}{G} \right)$$

این رابطه V سرعت موج فراصوت برحسب m/s، $\frac{W}{C}$ نسبت آب به سیمان، $\frac{S}{G}$ نسبت وزنی ماسه به شن، P_{\max} مقاومت فشاری نمونه مکعبی برحسب MPa است و a_0 ، a_1 ، a_2 و a_3 ضرایب ثابتی هستند که با بررسی رفتار نمونه‌ها و حداقل کردن مجموع مربعات باقیمانده‌ها در ادامه به دست آمده‌اند. جدول ۵ قسمتی از خروجی نرم‌افزار SPSS است که مقادیر به دست آمده برای a_0 ، a_1 ، a_2 و a_3 را نشان می‌دهد. جدول ۶ نیز نشان‌دهنده نتایج آنالیز واریانس این تحلیل است.

چنان‌که در جدول ۵ مشاهده می‌کنید، مقادیر ثابت‌ها برابر با $a_0 = 9.164$ ، $a_1 = 0.000374$ ، $a_2 = -33.17$ و $a_3 = -0.824$ به دست آمدند؛ پس رابطه مقاومت فشاری نمونه مکعبی با سرعت موج طولی با توجه به طرح اختلاط بتن به صورت زیر است:

$$P_{\max} = 9.164 e^{0.000374 V} - 33.17 \left(\frac{W}{C} \right) - 0.824 \left(\frac{S}{G} \right),$$

$$R^2 = 0.674 \quad (۴)$$

پارامترهای این رابطه عبارت‌اند از: V سرعت موج فراصوت برحسب m/s، $\frac{W}{C}$ نسبت آب به سیمان، $\frac{S}{G}$ نسبت ریزدانه به درشت‌دانه، P_{\max} مقاومت فشاری نمونه مکعبی

۷- مراجع

- [1] International Atomic Energy Agency, T. C. S. No 10., "Ultrasonic Testing of Materials at Level 2", 1999.
- [2] H.Y. Qasrawi and I.A. Marie, "The use of USPV to anticipate failure in concrete under compression", *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, No. 12, 2003, pp. 2017-2021.
- [۳] سمیه خراسانی و فرهنگ هنرور، «مدل سازی تکنیک بازرسی فراصوتی زمان پرواز پراش (ToFD) با استفاده از روش اجزای محدود»، *مجله مدل سازی در مهندسی*، دوره ۱۳، شماره ۴۱، تابستان ۱۳۹۴، صفحه ۲۶-۱۳.
- [4] C. ASTM, 597, Standard test method for pulse velocity through concrete. *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 4, 2000.
- [5] A. Davis and et al., "Nondestructive test methods for evaluation of concrete in structures", *American Concrete Institute, ACI*, Vol. 228, 1998.
- [6] B. Standard, "Testing concrete", *Recommendations for the*, 1881.
- [۷] علی خیرالدین و نازنین کاشیها، «بررسی رفتار سازه‌ای اتصال دال پس کشیده به ستون در معرض برش پانچ»، *مجله مدل سازی در مهندسی*، دوره ۸، شماره ۲۳، زمستان ۱۳۸۹، صفحه ۵۹-۳۷.
- [۸] محمدعلی لطف‌اللهی یقین و مجتبی ضیائیون، «بررسی رفتار ستون‌های مرکب دو لایه تحت اثر متقابل نیروی محوری و لنگر خمشی»، *مجله مدل سازی در مهندسی*، دوره ۱۰، شماره ۳۱، زمستان ۱۳۹۱، صفحه ۲۳-۱۵.
- [9] R.E. Philleo, "Comparison of results of three methods for determining young's modulus of elasticity of concrete", in *Journal Proceedings*, Vol. 51, No. 1, 1955, pp. 461-470.
- [10] T. Gudra and B. Stawiski, "Non-destructive strength characterization of concrete using surface waves", *Ndt & E International*, Vol. 33, No. 1, 2000, pp. 1-6.
- [11] J. Krautkrämer and H. Krautkrämer, *Ultrasonic testing of materials*. Springer Science & Business Media, 2013.
- [12] D.S. Lane, "Evaluation of concrete characteristics for rigid pavements", 1998.
- [13] V. Malhotra and P. K. Mehta, "Concrete technology: past, present, and future: proceedings of V. Mohan Malhotra symposium", *American Concrete Institute*, 1994.
- [14] V.M. Malhotra, "In situ/nondestructive testing of concrete", *American Concrete Institute*, 1984.
- [15] V.M. Malhotra and N.J. Carino, *CRC handbook on nondestructive testing of concrete*, CRC press, 1991.
- [16] J. Popovics, J. Achenbach and W.-J. Song, "Application of new ultrasound and sound generation methods for testing concrete structures", *Magazine of Concrete Research*, Vol. 51, No. 1, 1999, pp. 35-44.
- [17] S. Popovics, "Analysis of the concrete strength versus ultrasonic pulse velocity relationship", *Materials Evaluation*, Vol. 59, No. 2, 2001, pp. 123-130.
- [18] S. Popovics, N.M. Bilgutay, M. Caraoguz and T. Akgul, "High-frequency ultrasound technique for testing concrete", *Materials Journal*, Vol. 97, No. 1, 2000, pp. 58-65.
- [19] S. Popovics, J.L. Rose and J.S. Popovics, "The behaviour of ultrasonic pulses in concrete", *Cement and Concrete Research*, Vol. 20, No. 2, 1990, pp. 259-270.
- [20] A.E. Ben-Zeitun, "Use of pulse velocity to predict compressive strength of concrete", *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, Vol. 8, No. 1, 1986, pp. 51-59.
- [21] J.A. Bogas, M.G. Gomes and A. Gomes, "Compressive strength evaluation of structural lightweight concrete by non-destructive ultrasonic pulse velocity method", *Ultrasonics*, Vol. 53, No. 5, 2013, pp. 962-972.
- [22] A. Jain, A. Kathuria, A. Kumar, Y. Verma and K. Murari, "Combined use of non-destructive tests for assessment of strength of concrete in structure", *Procedia Engineering*, Vol. 54, 2013, pp. 241-251.
- [23] M.A. Musmar and N.A. Alhadi, "Relationship Between Ultrasonic Pulse Velocity and Standard Concrete Cube Crushing Strength", www.researchgate.net, 2008.
- [24] S.K. Rao, P. Sravana and T.C. Rao, "Experimental studies in Ultrasonic Pulse Velocity of roller compacted concrete pavement containing fly ash and M-sand", *International Journal of Pavement Research and Technology*, Vol. 9, No. 4, 2016, pp. 289-301.
- [25] M. Shariq, J. Prasad and A. Masood, "Studies in ultrasonic pulse velocity of concrete containing GGBFS", *Construction and Building Materials*, Vol. 40, 2013, pp. 944-950.
- [26] J. Pallant and S.S. Manual, *A step by step guide to data analysis using SPSS*, Berkshire UK: McGraw-Hill Education, 2010.