



تخمین برخی خواص بتن های با مقاومت بالا (HSC)، با استفاده از تکنیک پالس فراصوت

منصور قربانی اقدم^۱، وحداد زرگری^۲، حسن افشین^۳
دانشگاه صنعتی سهند تبریز-دانشکده مهندسی عمران-سازه
m_ghorbany@sut.ac.ir

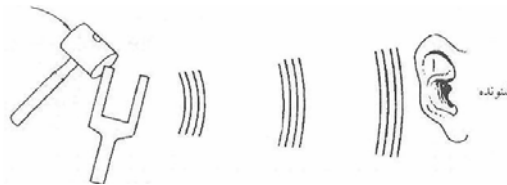
خلاصه

در این تحقیق، نحوه عملکرد تکنیک سرعت پالس فراصوت بعنوان یک آزمون غیر مخرب برای بتن بمنظور تخمین خواص مکانیکی بتن پر مقاومت از قبیل مقاومت فشاری، کششی، مدول الاستیسیته دینامیکی، عیار سیمان و سن بتن و مورد بررسی قرار می گیرد. برای این منظور حدود ۵۴ طرح اختلاط (۵۰۰ نمونه مکعبی و استوانه ای) در سنین ۲۸، ۷ و ۹۰ روزه مورد استفاده قرار گرفت. در آخر مدول الاستیسیته دینامیکی آزمایشگاهی نمونه های استوانه ای که توسط دستگاه UTM در سرعت های بارگذاری بسیار بالا (بارگذاری دینامیکی) صورت پذیرفت با مدول ارتجاعی بدست آمده از فرمول مورد تایید ایران مورد بررسی و مقایسه قرار می گیرند.

کلمات کلیدی: پالس فراصوت، مدول الاستیسیته دینامیکی، بتن پر مقاومت، UTM

مقدمه

قرنهاست که انسان با نواختن ضربه بر قطعات و ارزیابی تفاوت صداهای تولید شده توسط آنها، کیفیت قطعات را به نوعی می آزماید (شکل ۱)



شکل ۱- امواج صوتی ناشی از برخورد

علیرغم سابقه طولانی مطالعه و تحقیق در علم صوت، کاربردهای نوین امواج فراصوتی تنها در اوایل قرن بیستم آغاز گردید. اولین کاربرد فراصوت برای بازرسی مواد به سال ۱۹۲۹ باز می گردد. دو محقق بنام سوکولوف از روسیه و مالهاوزر از آلمان اولین کسانی بودند که از امواج فراصوت برای بازرسی مواد استفاده کردند.

تئوری آزمایش

صوت به منظور آزمایش فراصوت، می تواند به عنوان انرژی در حال حرکت تلقی شود. صوت می تواند در هوا و یا در جامدات با ارتعاشات مولکولی حول نقطه ثابت حرکت کند. هر مولکول یا ذره را می توان به عنوان یک ساچمه معلق در مرکز یک نوار لاستیکی فرض کرد. اگر ساچمه از محل اولیه خود منحرف و رها شود ساچمه به محل اولیه خود برگشته و به خاطر اینرسی موجود در جهت خلاف جهت اولیه به حرکت ادامه می دهد و به این ترتیب شروع به نوسان می کند تا در نهایت با از دست دادن انرژی خود به حال سکون در آید (شکل ۲). یک مدل پیچیده تر شامل تعداد زیادی ساچمه می باشد

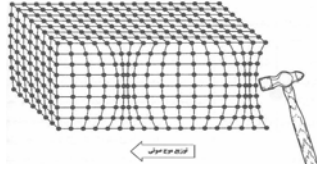
۱- دانشجوی کارشناسی ارشد عمران-سازه

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد عمران-سازه

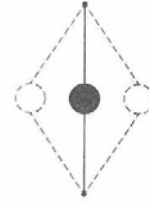
۳- استادیار دانشکده مهندسی عمران-سازه



این بار فرض کنید که هر ساچمه با فنرهای پیچشی به ساچمه های دیگر وصل شده بطوریکه هم می تواند کشیده و هم فشرده شود. جابجایی مولکولهای بیرونی باعث حرکت مولکولهای مجاور شده و حرکت نوسانی مولکولها بصورت موجهای تراکم و انبساط گسترش می یابد. امواج صوتی اغلب با موج سینوسی بیان می شوند [۱]. (شکل ۳).



شکل ۳-مدلسازی پیچیده یک ماده به توسط تعداد زیادی از ساچمه ها



شکل ۲-مدلسازی یک ملکول بصورت یک ساچمه معلق

ماهیت صوت

امواج صوتی از نوع الاستیک (مادی) هستند که از میان محیط های مایع و جامد میتوان عبور کنند. بسامد محدوده شنوایی ۲۰Hz الی ۲۰۰۰۰Hz است، اما میتوان امواج الاستیکی تا ۵۰۰ MHz نیز تولید کرد که ماهیت امواج صوتی را داشته باشند. امواج الاستیکی که دارای بسامد بالاتر از حد شنوایی هستند امواج فراصوتی نامیده می شوند

دامنه کاربرد

اندازه گیری پالس های فراصوت در بتن برای کاربردهایی به شرح زیر مورد استفاده قرار می گیرد:

- الف- تعیین یکنواختی بتن در یک عضو یا بین اعضای سازه
- ب- کشف وجود ترک و اندازه گیری عمق آن و دیگر نارسایی ها مانند منافذ
- پ- اندازه گیری تغییرات خواص بتن با زمان
- ج- تعیین مدول الاستیسیته و ضریب پواسون دینامیکی

سزعت پالس فراصوت تحت تاثیر خواص الاستیک و مکانیکی بتن است. بنابراین متغیر بودن سزعت پالس در طول مسیرهای مختلف در سازه نشانه تغییرات در کیفیت بتن می باشد. در مواردی که قسمتی از بتن تحت آزمایش، دارای تراکم کم، تخلخل زیاد و آسیب دیدگی باشد سزعت پالس کاهش یافته و در نتیجه تعیین وسعت نارسایی امکان پذیر است. تغییرات در ساختار بتن که بدلیل کسب مقاومت ویا آسیب دیدگی ایجاد می گردد، در سرعت پالس انعکاس می یابد و باعث افزایش یا کاهش آن می شود سرعت پالس V بر حسب (Km/s) یا (m/s) از رابطه زیر به دست می آید [۲]:

که در آن:

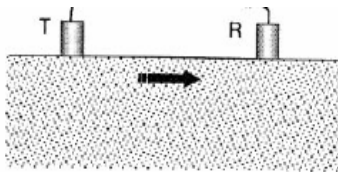
$$V = \frac{L}{T} \quad (1)$$

L = طول مسیر پالس
T = زمان عبور پالس

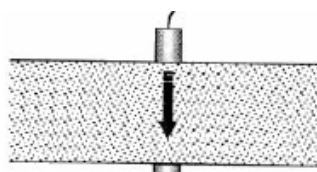
آرایش قرار گیری پروب ها

پروب گیرنده، آن قسمت از پالس را کشف می کند که زودتر برسد. در واقع ارتعاشات پیشرونده طولی سریعتر می رسند. هر چند در امتداد عمود بر سطح پروب فرستنده، حداکثر انرژی به بتن منتقل می شود، ولی دریافت پالس ها در امتداد دیگر امکان پذیر است. بنابراین نحوه قرار دادن مولد ها بصورت های

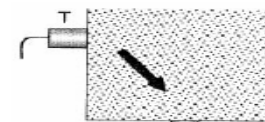
زیر امکان پذیر می باشد [۳]. (شکل ۴)



ج) انتقال غیر مستقیم (در یک سطوح)



ب) انتقال مستقیم (سطوح مخالف)



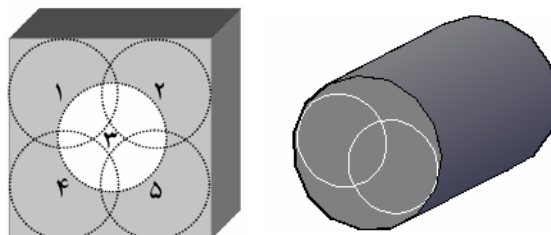
الف) انتقال غیر مستقیم (سطح مجاور)

شکل ۴- آرایش قرار گیری پروب ها



تعداد نقاط آزمایشی بر روی سطح بتن

در استاندارد ایران، به تعداد نقاط آزمایشی در واحد سطح بتن اشاره ای نشده است. ولی در این پروژه، برای اینکه تمامی حجم بتن با استفاده از امواج فراصوت تحت پوشش قرار گیرد، با توجه به (شکل ۵)، پنج منطقه بر روی سطح بتن مکعبی و دو منطقه بر روی بتن استوانه ای انتخاب گردید، که با انجام آزمایش بر روی آن پنج منطقه، قسمت اعظمی از سطح و حجم نمونه مکعبی بتنی مورد آزمایش قرار می گرفت. در اشکال زیر محل های قرارگیری پروب ها بر روی نمونه های مکعبی و استوانه ای نشان داده شده است.

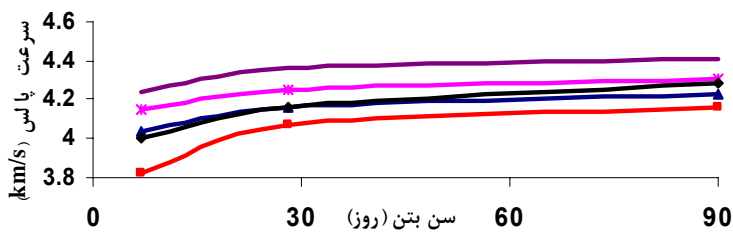


شکل ۵- شکل قرار گیری پروب ها بر روی نمونه های مکعبی و استوانه ای

عملکرد تکنیک سرعت پالس فراصوت در بتن پر مقاومت سازه ای

اثر سن بتن پر مقاومت بر روی سرعت پالس

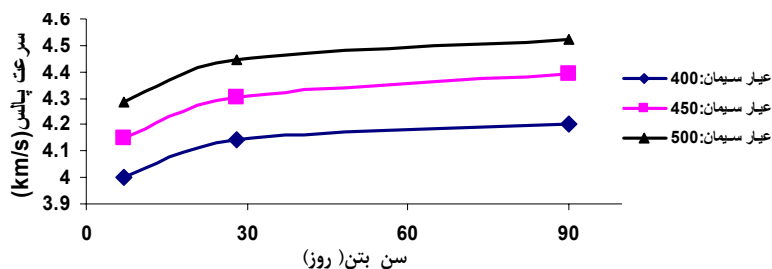
نتایج آزمون تعیین سرعت پالس در نمونه های مکعبی بتن پر مقاومت و نمونه های استوانه ای پر مقاومت نشان دادند که، با افزایش سن بتن، سرعت انتقال پالس در نمونه های مورد آزمایش افزایش پیدا می کند در شکل (۵-۱) چند نمونه از نتایج این آزمون آورده شده است. با توجه به نمودار شکل (۵-۱) مشخص می شود که نرخ افزایش سرعت پالس از سنین ۷ روزه تا ۲۸ روزه زیاد می شود و از سن ۲۸ الی ۹۰ روزه نرخ افزایش سرعت پالس کاهش می یابد که این امر با عملکرد مقاومت فشاری بتن با افزایش سن آن انطباق دارد.



شکل ۶- اثر سن بتن بر روی سرعت پالس

تأثیر عیار سیمان بر سرعت انتقال پالس فراصوت در بتن پر مقاومت

با افزایش عیار سیمان (تا ۶۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب) در بتن، مقاومت فشاری آن افزایش پیدا می کند نتایج این تحقیق نیز نشان دادند که با افزایش عیار سیمان، سرعت پالس در نمونه های بتن پر مقاومت افزایش یافته است.

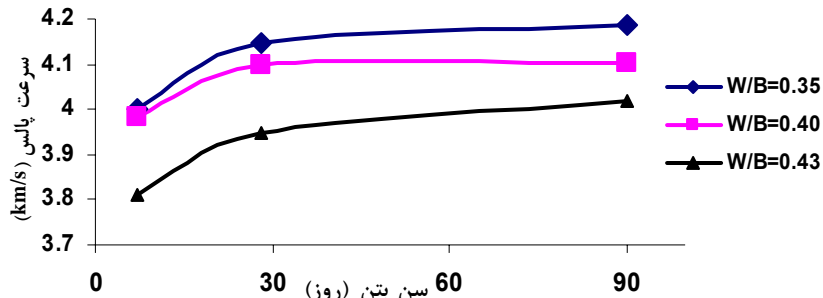


شکل ۷- اثر عیار سیمان بر روی سرعت پالس



تأثیر نسبت آب به مواد سیمانی بر روی سرعت پالس فراصوت عبوری از بتن پر مقاومت

با کاهش آب به مواد سیمانی (W/C)، مقاومت فشاری بتن افزایش می یابد. نتایج این تحقیق نشان دادند که، در اکثر مواقع با کاهش نسبت آب به سیمان در مخلوط بتن پر مقاومت، سرعت پالس در آن افزایش یافته است.



شکل ۸-تأثیر نسبت آب به سیمان بر روی سرعت پالس

رابطه بین سرعت انتقال پالس فراصوت و مقاومت فشاری نمونه های مکعبی و مقاومت کششی نمونه های استوانه ای بتن پر مقاومت سازه ای

آقای **Ravindrearajah**، در تحقیقی که بر روی بتن با مقاومت بالا انجام داده است، و در آگوست سال ۱۹۹۱ میلادی در ملیورن استرالیا ارائه نموده است، اعلام کرده است که، بسیاری از تحقیق ها نشان داده است رابطه بین مقاومت فشاری و سرعت پالس می تواند توسط یک تابع نمایی بصورت زیر تخمین زده شود [۳]

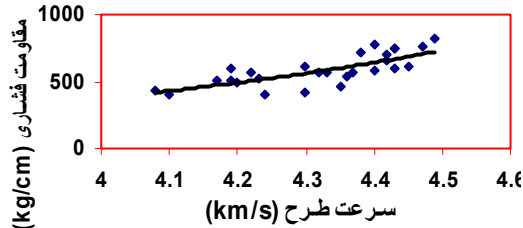
$$f = a.e^{bv} \quad (2)$$

که در آن: مقاومت فشاری (Mpa) v : سرعت پالس (Km/s) a و b : ثابت های عملی.

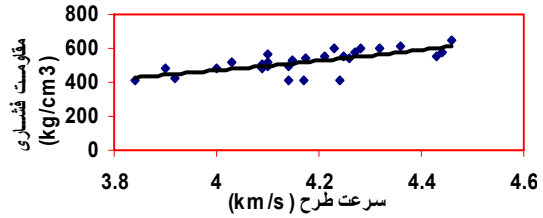
بر این اساس، با انجام آزمایش تعیین سرعت پالس و آزمون تعیین مقاومت فشاری و کششی ۲۸ روزه بر روی ۳۲۴ نمونه بتن پر مقاومت و با برآزش منحنی نمایی از میان داده ها، روابط همبستگی بین سرعت پالس و مقاومت فشاری و کششی با تقریب قابل قبولی بدست آمدند. برای هر شش شاخه از طرحهای اختلاط بتن پر مقاومت، بطور مجزا رابطه ای بین سرعت پالس و مقاومت فشاری و کششی واقعی با برآزش یک منحنی نمایی بدست آمد، که از شکلهای ۹ الی ۲۲، این منحنی ها نشان داده شده اند. مقادیر a و b به همراه R^2 ضریب همبستگی منحنی های برآزش شده، برای تمامی نمودارها در جدول ۱ و ۲ نشان داده شده اند. در این مقاله A ، B و C به ترتیب عبار ۴۰۰، ۴۵۰ و ۵۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب می باشند. برای مثال طرح ۴۳-۱-۶۵-C عدد دوم از چپ نشان دهنده نسبت ماسه به شن به در صد، عدد سوم از چپ، عدد ۱ نشان دهنده درصد و عدد ۵ نشان دهنده مقدار ۰/۵ درصد مقدار فوق روان کننده مصرفی و عدد آخر نشان دهنده نسبت آب به سیمان می باشد.

جدول ۱-مقادیر a و b به همراه ضریب همبستگی برای نمونه های مکعبی و استوانه ای

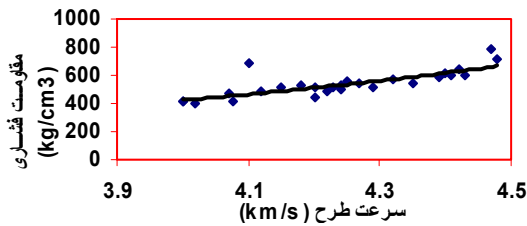
نمونه های استوانه ای			نمونه های مکعبی			گروه های آزمایشی
R^2	b	a	R^2	b	a	
۰/۱۶۵۹۰	۰/۱۸۴۶	۰/۱۶۸۵۴	۰/۱۷۲۸۱	۱/۲۲۷	۱/۸۶۴	طرح های ۳۵-۱-۶۵-A الی ۴۳-۱-۶۵-C
۰/۱۷۰۴۸	۰/۱۹۶۲۸	۰/۱۴۱۸۹	۰/۱۶۵۸۶	۰/۱۵۷۰۳	۴۷/۹۲۵	طرح های ۳۵-۵-۶۵-A الی ۴۳-۵-۶۵-C
۰/۱۶۸۸۷	۰/۱۷۷۹	۰/۱۹۴۴۷	۰/۱۷۳۳۷	۰/۱۹۴۴۷	۹/۶۶۱۴	طرح های ۳۵-۱-۷۰-A الی ۴۳-۱-۷۰-C
۰/۱۸۵۹۳	۰/۱۷۵۲۸	۱/۰۸۹۲	۰/۱۶۴۵۴	۰/۱۷۹۲۲	۱۸/۹۲۴	طرح های ۳۵-۵-۷۰-A الی ۴۳-۵-۷۰-C
۰/۱۶۸۷۱	۰/۱۷۳۷۶	۱/۰۳۴	۰/۱۶۸۵۱	۰/۱۸۷۹۹	۱۱/۹۹۶	طرح های ۳۵-۱-۷۷-A الی ۴۳-۱-۷۷-C
۰/۱۹۰۱۳	۱/۱۷۹۷	۰/۱۰۱۴۹	۰/۱۷۲۹۴	۰/۱۸۴۸	۱۵/۶۹۶	طرح های ۳۵-۵-۷۷-A الی ۴۳-۵-۷۷-C
۰/۱۶۴۲۰	۰/۱۷۸۲	۰/۱۹۲۵۵	۰/۱۶۴۵۳	۰/۱۸۲۳	۱۶/۳۱۳	تمامی طرح ها



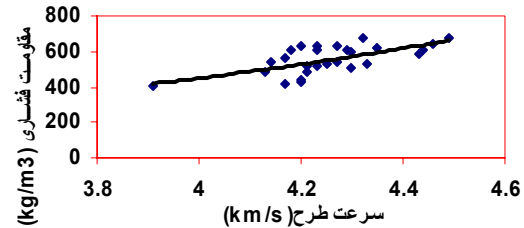
شکل ۱۰- منحنی برازش شده طرح های A-۶۵-۱-۴۳ الی C-۶۵-۱-۴۳



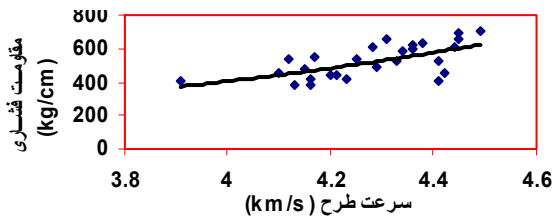
شکل ۹- منحنی برازش شده طرح های A-۶۵-۵-۴۳ الی C-۶۵-۵-۴۳



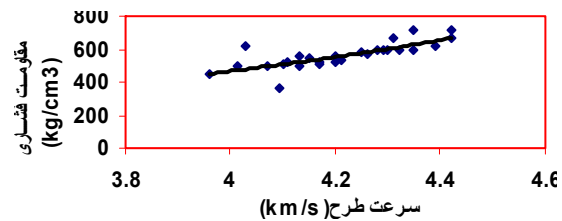
شکل ۱۲- منحنی برازش شده طرح های A-۷۰-۵-۴۳ الی C-۷۰-۵-۴۳



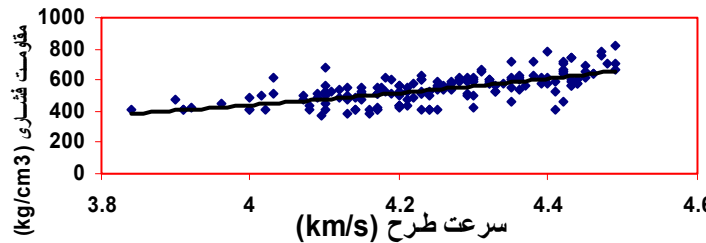
شکل ۱۱- منحنی برازش شده طرح های A-۷۰-۱-۴۳ الی C-۷۰-۱-۴۳



شکل ۱۴- منحنی برازش شده طرح های A-۷۷-۱-۴۳ الی C-۷۷-۱-۴۳

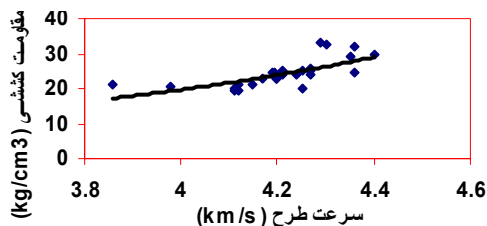


شکل ۱۳- منحنی برازش شده طرح های A-۷۷-۵-۴۳ الی C-۷۷-۵-۴۳

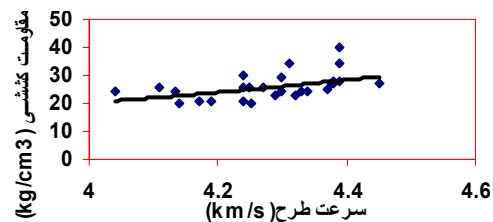


شکل ۱۵- منحنی برازش شده برای کلیه طرح ها

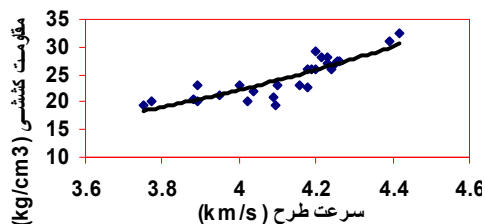
نتایج نشان می دهند که، ضریب همبستگی منحنی هایی که برای شاخه ها بدست آمدند، بزرگتر از مقدار این ضریب برای حالتی است که تمامی طرح اختلاطها در برقراری رابطه مورد استفاده قرار گرفته اند. لذا در برقراری رابطه همبستگی بین سرعت پالس و مقاومت، هرچقدر نسبت های اختلاط بکار برده شده در طرح ها از تنوع کمتری برخوردار باشند، جواب بهتری بدست خواهد آمد. بعبارت دیگر، استفاده از تکنیک سرعت پالس بایستی با کالیبراسیون اولیه همراه باشد و نسبت دادن یک رابطه ثابت برای تخمین مقاومت بازه بزرگی از بتن ها، صحیح نخواهد بود در زیر منحنی های همبستگی مربوط به نمونه های استوانه ای آورده شده است.



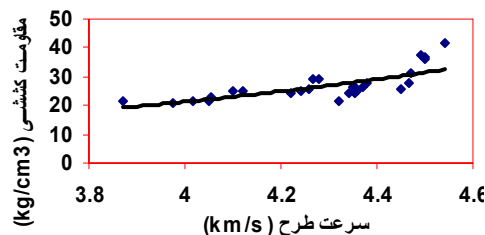
شکل ۱۷- منحنی برازش شده طرح های A-۶۵-۱-۴۳ الی C-۶۵-۱-۴۳



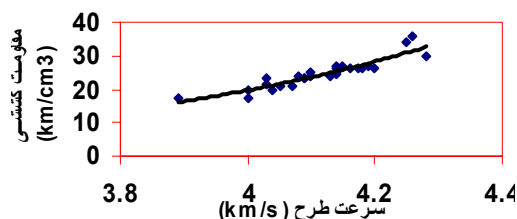
شکل ۱۶- منحنی برازش شده طرح های A-۶۵-۵-۴۳ الی C-۶۵-۵-۴۳



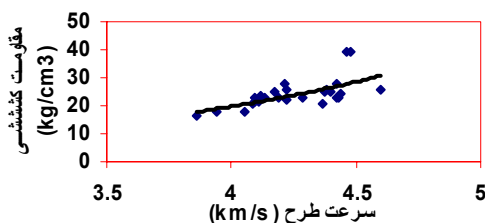
شکل ۱۹- منحنی برازش شده طرح های A-۷۰-۵-۴۳ الی C-۷۰-۵-۴۳



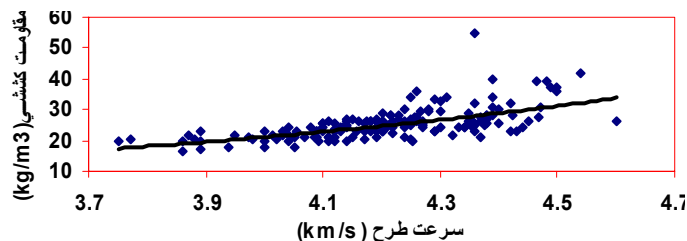
شکل ۱۸- منحنی برازش شده طرح های A-۷۰-۱-۴۳ الی C-۷۰-۱-۴۳



شکل ۲۱- منحنی برازش شده طرح های A-۷۷-۱-۳۵ الی C-۷۷-۱-۴۳



شکل ۲۰- منحنی برازش شده طرح های A-۷۷-۵-۴۳ الی C-۷۷-۵-۴۳



شکل ۲۲- منحنی برازش شده برای کلیه طرح ها

۷-۵- اثر اسلامپ بتن پر مقاومت مکعبی و استوانه ای بر روی رابطه همبستگی

یکی از عواملی که موجب ایجاد اختلاف در مقاومت فشاری و یا سرعت پالس یک نمونه نسبت به سایر نمونه ها می گردد بالا بودن اسلامپ آن بتن می باشد. با بالا رفتن اسلامپ در بتن، جدایی دانه های با چگالی مختلف به آسانی انجام گرفته و سبب وجود ناهمگنی در نمونه مورد نظر شده و در نتیجه مقاومت فشاری و سرعت انتقال پالس را تحت تاثیر قرار خواهد داد. برای اثبات این مطلب، رابطه همبستگی بین مقاومت فشاری و سرعت پالس فراسوت، یکبار برای طرح های اختلاط با اسلامپ کمتر یا مساوی ۱۲ سانتیمتر و یکبار برای طرح ها اختلاط با اسلامپ بزرگتر از ۱۲ سانتیمتر برقرار گردید

جدول ۲- ثابت های a و b به همراه ضریب همبستگی برای نمونه های مکعبی

گروه های آزمایشی	a	b	R^2
اسلامپ کمتر یا مساوی ۱۲ سانتیمتر	۲۵/۰۴۹	۰/۷۲۷۳	۰/۶۹۲۷
اسلامپ بزرگتر از ۱۲ سانتیمتر	۱۱/۹۴۴	۰/۸۹۵۵	۰/۶۷۴۹

جدول ۳- ثابت های a و b به همراه ضریب همبستگی برای نمونه های استوانه ای

گروه های آزمایشی	a	b	R^2
اسلامپ کمتر یا مساوی ۱۲ سانتیمتر	۰/۹۸۳۴	۰/۷۶۳۵	۰/۶۷۷۴
اسلامپ بزرگتر از ۱۲ سانتیمتر	۱/۱۶۷۵	۰/۷۲۷۸	۰/۶۵۱۷



تعیین مدول الاستیسیته و نسبت پواسون دینامیکی

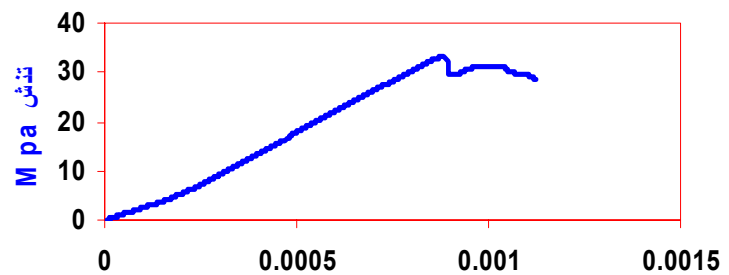
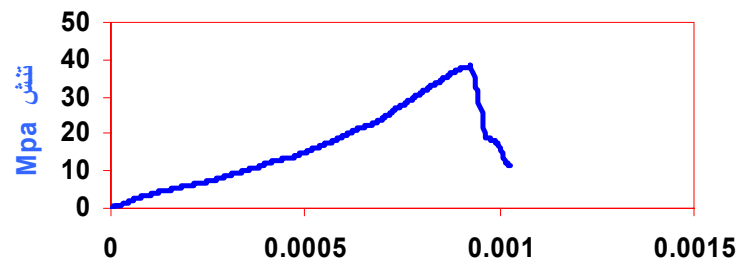
رابطه بین مدول الاستیسیته و سرعت پالس فراصوت از فرمول زیر بدست می آید [۴]، [۵]:

$$E_d = \rho V^2 \frac{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}{1 - \mu} \quad (3)$$

که در آن: E_d = مدول الاستیسیته دینامیکی (MPa) ، μ = نسبت پواسون دینامیکی ، ρ = دانسیته بتن ، V = سرعت پالس (km/s) در این مقاله، برای بدست آوردن مدول الاستیسیته دینامیکی نمونه های استوانه ای، نمونه رابا استفاده از دستگاه **UTM** (شکل ۱۵)، تحت بارگذاری دینامیکی (مدت بسیار کوتاه بارگذاری) قرار داده و با رسم شیب مماسی نمودار تنش- کرنش هر نمونه، مدول الاستیسیته دینامیکی بدست می آید. در این مقاله، مدت زمان بارگذاری دقیقا ۱/۵ میلیمتر بر ثانیه تعریف شد. تعدادی از نمودارهای تنش-کرنش که توسط دستگاه **UTM** رسم شده در زیر به نمایش در آمده است. در جدول ۵، مدول الاستیسیته دینامیکی محاسبه شده توسط فرمول (۳) و نیز مدول الاستیسیته دینامیکی محاسبه شده توسط رسم شیب مماسی برای چند نمونه استوانه ای مقایسه شده اند در کلیه نمونه ها، ضریب پواسون دینامیکی بطور میانگین، برابر ۰/۱۸ محاسبه شده است.



شکل ۲۳-نمایی از دستگاه UTM



شکل ۲۳-منحنی های تنش-کرنش استوانه ای رسم شده توسط UTM

جدول ۴-مقایسه مدول الاستیسیته دینامیکی تئوری و آزمایشگاهی

درصد خطا بین تئوری و آزمایشگاهی	مدول الاستیسیته دینامیکی (UTM)	مدول الاستیسیته دینامیکی تئوری	سرعت پالس (km/s)	وزن مخصوص (Kg / m^3)	شماره نمونه
۴	۳۵۶۰۰	۳۷۱۰۰	۴/۱	۲۴۰۰	A-۷۰-۱-۳۵
۷/۶	۳۳۲۵۰	۳۵۸۰۰	۴/۰۲	۲۴۱۰	A-۷۰-۱-۴۰
۵/۹	۳۲۰۰۰	۳۳۹۰۰	۳/۹۲	۲۴۰۰	A-۷۰-۱-۴۳
۵	۳۷۸۵۰	۳۹۷۵۰	۴/۲۳	۲۴۵۰	A-۷۷-۱-۳۵
۷/۹	۳۶۵۰۰	۳۹۴۰۰	۴/۱۹	۲۴۴۰	A-۷۷-۱-۴۰



ادامه جدول ۴-مقایسه مدول الاستیسیته دینامیکی تئوری و آزمایشگاهی

شماره نمونه	وزن مخصوص (Kg/m^3)	سرعت پالس (km/s)	مدول الاستیسیته دینامیکی تئوری	مدول الاستیسیته دینامیکی (UTM)	درصد خطا بین تئوری و آزمایشگاهی
A-۷۷-۱-۴۳	۲۴۴۰	۴/۱۱	۳۷۹۰۰	۳۴۰۰۰	۱۱
B-۷۰-۵-۳۵	۲۴۶۰	۴/۳	۴۱۸۰۰	۳۸۷۵۰	۷/۸
B-۷۰-۵-۴۰	۲۴۳۳	۴/۲۱	۳۹۶۷۰	۳۶۰۰۰	۱۰
B-۷۰-۵-۴۳	۲۳۸۰	۴/۱۵	۳۷۷۰۰	۳۲۶۰۰	۱۵
B-۷۰-۱-۳۵	۲۴۷۰	۴/۳۲	۴۲۴۰۰	۴۳۲۰۰	۱/۸
B-۷۰-۱-۴۰	۲۴۵۰	۴/۲۹	۴۱۴۸۰	۴۱۵۰۰	۱
B-۷۰-۱-۴۳	۲۴۲۰	۴/۲۲	۳۹۶۴۰	۳۹۵۰۰	۰/۳
C-۶۵-۱-۳۵	۲۶۵۰	۴/۴۳	۴۷۸۰۰	۴۶۰۰۰	۳/۹
C-۶۵-۱-۴۰	۲۶۰۰	۴/۳۷	۴۵۶۰۰	۴۴۲۰۰	۳/۱
C-۶۵-۱-۴۳	۲۶۰۰	۴/۳۱	۴۴۴۰۰	۴۱۰۰۰	۳/۸
C-۷۰-۱-۳۵	۲۵۸۰	۴/۲۹	۴۳۶۰۰	۴۲۰۰۰	۳/۸
C-۷۰-۱-۴۰	۲۵۵۰	۴/۲۵	۴۲۳۰۰	۴۱۵۰۰	۱/۹

نتیجه گیری

- با توجه به نتایج این تحقیق، تکنیک سرعت پالس فراصوت بعنوان یکی از آزمونهای غیر مخرب بتن در تخمین خصوصیات آن، در مورد بتن های با مقاومت بالا، می تواند عملکرد خوبی داشته باشد و با این روش می توان برخی از خصوصیات مکانیکی این نوع بتن ها را تخمین زد به شرط آنکه از روابط خاص این نوع بتن ها استفاده گردد و ارائه یک رابطه خاص برای انواع مختلف بتن ها صحیح نخواهد بود.
- با افزایش عیار سیمان و کاهش نسبت آب به سیمان در مخلوطهای بتن های با مقاومت بالا، سرعت انتقال پالس فراصوت در نمونه های بتنی همانند مقاومت فشاری و کششی افزایش می یابد
- در طرح هایی که اسلامپ آنها بیشتر از ۱۲ سانتیمتر بود، ضریب همبستگی رابطه بین مقاومت فشاری و کششی و سرعت پالس فراصوت نسبت به سایر طرح هایی که اسلامپ کمتر از ۱۲ سانتیمتر داشتند مقدار کمتری رانشان می داد. می توان گفت این کاهش در ضریب همبستگی ناشی از ناهمگنی موجود بین نمونه ها در اثر جداسدگی دانه های ریز و درشت، به هنگام ویرنه زدن می باشد.
- استفاده از رابطه پیشنهادی استاندارد ایران، مبنی بر محاسبه مدول الاستیسیته دینامیکی بتن با استفاده از سرعت پالس، در مورد بتن پرمقاومت سازه ای موضوع این پروژه، نتایج خوبی را نشان داد و می توان گفت که استفاده از این رابطه، جهت محاسبه مدول الاستیسیته دینامیکی بتن های پر مقاومت موضوع این تحقیق صحیح می باشد.
- با بارگذاری ضربه ای و رسم شیب مماسی نمودار تنش- کرنش مربوطه می توان مدول الاستیسیته دینامیکی را بدست آورد

مراجع

- ۱- فامیلی هرمز، بتن شناسی (خواص بتن)، انتشارات دانشگاه علمو صنعت، ۱۳۷۹
- ۲- نشریه (ص-۳۱۶)، استاندارد آزمایشهای تعیین مقاومت بتن در سازه (آزمایش غیر مخرب و نیمه مخرب بتن)
- ۳-K. komolos,s. Popovics, T. numbergerova, B. Babal & g. Popovics, "Ultrasonic Pulse Velocity Test of Properties as Specified in Various Standards" USA June ۱۹۹۶
- ۴-ASTM C ۴۶۹-۹۴ "Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson'Ratio of Concrete in Compression" American Society for Testing and Materials ۲۰۰۲
- ۵-مضانیانپور علی اکبر، قدوسی پرویز، گنجیان اسماعیل، ریز ساختار، خواص و اجزای بتن (تکنولوژی بتن پیشرفته) تهران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر