

## تأثیر امواج توان زیاد فراصوتی در افزایش مقاومت فشاری بتن

صابر صفار \*

استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صدا و سیما، تهران، ایران.

سید محسن کریمی

کارشناس ارشد، مهندسی و مدیریت ساخت، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

مجید صافحیان

استادیار، مهندسی و مدیریت ساخت، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

### چکیده

امروزه باقی ماندن در بازارهای اقتصادی، به واسطه رقابت شدید تولید کنندگان، منوط به حفظ کیفیت و کاهش هزینه‌هاست. همچنین سختگیری‌ها و نگاه ویژه دولت‌ها در خصوص بهبود وضعیت زیست محیطی، صنایع را به سمت تکنولوژی‌های سودمندتر سوق داده است. بنابراین به کارگیری تکنولوژی‌های جدید که منجر به افزایش کیفیت محصول و کاهش هزینه بدون آسیب به محیط زیست شوند، مطلوب خواهند بود. در سال‌های اخیر استفاده از امواج فراصوتی توان زیاد با توجه به نداشتن آلودگی صوتی، برای بهبود فرآیندهای مهندسی بسیار مورد توجه صنایع مختلف قرار گرفته است. مؤثر بودن این امواج در صنایع ساخت و تولید نظیر کاهش نیروهای ماشینکاری، افزایش صافی سطح و ریزدانه کردن فلزات در حین انجماد، انگیزه نویسندگان برای استفاده از آن در صنعت ساختمان شد. بدین منظور در این تحقیق، استفاده از امواج توان زیاد فراصوتی در زمان‌های متفاوت و فرکانس ۲۰ کیلو هرتز در متراکم‌سازی بتن و تأثیر آن بر مقاومت فشاری بتن مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که استفاده از امواج توان زیاد فراصوتی به عنوان یک فرآیند تکمیلی در متراکم‌سازی بتن تازه، می‌تواند باعث افزایش مقاومت فشاری بتن تا ۱۰ درصد شود.

واژه‌های کلیدی: تراکم بتن، جذب آب بتن، امواج آلتراسونیک توان زیاد، فرکانس.

\* نویسنده مسئول: saffar@tribu.ac.ir

## ۱- مقدمه

پرداخته می‌شود.

مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که امواج توان بالای آلتراسونیک<sup>۱</sup> در افزایش چگالی<sup>۲</sup> و ریزدانه کردن مواد فلزی بسیار موثر است [۵]. چنانچه بتوان به منظور متراکم‌سازی بتن، این امواج را جایگزین ویراتورهای معمولی و متداول در صنعت ساختمان نمود، بسیاری از نقاط ضعف و مشکلات ناشی از تراکم غیر اصولی بتن، نظیر جداشدگی، آب انداختگی و تخلخل مرتفع می‌شود. همچنین، آلودگی صوتی حاصل از ویریه زنی به دلیل بالاتر بودن فرکانس امواج آلتراسونیک از حد شنوایی انسان، حذف شده و امکان لحاظ کردن و استانداردهای نوفه<sup>۳</sup> فراهم می‌شود.

امواج آلتراسونیک در فرآیندهای تولیدی (ماشینکاری، سوراخکاری، برشکاری و شکلدهی) و فرآیندهای اندازه‌گیری مانند آزمون‌های غیر مخرب) کاربرد فراوانی دارند [۶].

در سال ۲۰۱۲ محققانی مانند صدیق<sup>۴</sup> و همکاران، و همچنین کی لین کیو و تسائو<sup>۵</sup> با تحقیق بر روی تأثیر امواج آلتراسونیک بر فرآیندهای تولیدی توانستند تأثیر مثبت این امواج بر بهبود کیفیت فرآیندهایی مانند سوراخکاری و برشکاری و همچنین کمتر شدن حرارت تولیدی و در نتیجه کاهش منطقه حرارتی<sup>۶</sup> (HAZ) را نشان دهند [۷-۹]. در تحقیق دیگری که در سال ۲۰۱۷ توسط عابدینی، عبدالله و علیزاده بر روی تأثیر امواج آلتراسونیک بر ریزساختار فلزات انجام پذیرفت، نشان داده شد که اعمال امواج آلتراسونیک بر فلزات در حال انجماد در فرآیند ریخته‌گری، قبل از سخت‌شدگی، باعث ریزساختار شدن فلز گردیده و افزایش مقاومت کششی و همچنین افزایش چقرمگی در فلز را به دنبال خواهد داشت [۵]. در سال ۲۰۱۷ فرتاشوند و همکاران، کومار<sup>۷</sup> و همکاران اثر امواج آلتراسونیک بر روی مشخصات مکانیکی فلزات تهیه شده به روش متالورژی پودر را مورد بررسی قرار دادند. [۱۰-۱۱].

تهیه بتن و فشردن آن شباهتی به فرآیند فشردن سازی در متالورژی پودر فلزات دارد و از اینرو، تحقیق انجام شده در سال ۲۰۱۷ توسط عابدینی، عبدالله و علیزاده مورد توجه است. آنها نشان دادند ارتعاشات آلتراسونیک به روند تحکیم و سخت‌شدگی پودر

از جمله ویژگی‌های مهم بتن با کیفیت مطلوب، پایداری بتن است که تأثیر زیادی در حفظ کیفیت بتن با گذشت زمان دارد. بتن مقاوم در برابر عوامل جوی باید دارای ویژگی‌های مشخصی باشد که مهم‌ترین آن‌ها، بر خورداری از سنگ‌دانه با کیفیت مناسب و تخلخل و جذب آب کم است. یکی از راه‌های کاهش تخلخل و جذب آب در بتن، متراکم‌سازی مناسب است. پایداری بتن بستگی به مواد تشکیل‌دهنده، نسبت‌ها و روش‌های اختلاط، جا دادن، تراکم و عمل‌آوری بتن دارد [۱-۴]. از منظر اجرا، ضعف‌هایی در لرزاندن بتن با استفاده از ویراتورهای متداول موجود که عمده آن به دلیل عدم به‌کارگیری کارگران ماهر و یا نبود کارگران باتجربه در مناطق دور افتاده می‌باشد، بوجود می‌آید. همچنین وجود آسیب‌های جسمی و روحی (بواسطه آزار صوتی و گاه تطبیق فرکانس طبیعی با بدن انسان) وارد بر کارگران، کاهش آلودگی-های صوتی ناشی از صدای ویراتور و در نهایت افزایش کیفیت و مقاومت نهایی بتن در سازه‌ها، استفاده از روش‌های نوین در متراکم‌سازی بتن را بسیار جذاب و با اهمیت‌تر ساخته است.

از آنجاییکه استفاده از امواج فراصوتی توان زیاد در متراکم‌سازی بتن بسیار جدید بوده و مقالات متعددی در این زمینه در صنعت عمران موجود نیست، به منظور بیان دلیل استفاده ایده تأثیرگذاری این امواج در متراکم‌سازی بتن ابتدا مطالعات در زمینه‌های دیگر که به لحاظ فیزیکی اثبات‌کننده تأثیر این امواج هستند، پرداخته می‌شود. و سپس موارد محدود استفاده شده در صنعت عمران، بیان خواهد شد. به طور کلی و براساس تحقیقات گسترده انجام شده، مشخص شده است که امواج فراصوت با کاهش ضریب اصطکاک و یا به عبارت دیگر با تبدیل ضریب اصطکاک استاتیکی به دینامیک، باعث بهبود فرآیندها می‌شود. بنابراین اگر بتوان اصطکاک بین ذرات چسبیده سیمان، شن و ماسه موجود در بتن را کاهش داد، امکان دسترسی به تراکم بیشتر و در نتیجه استحکام فشاری زیادتر میسر خواهد بود. بنابراین ابتدا به تأثیر امواج فراصوتی توان زیاد در کاهش ضریب اصطکاک در فرآیندهای تولیدی به‌عنوان انگیزه و ایده اصلی محققین این مقاله است،

<sup>5</sup> Kuo and Tsao

<sup>6</sup> Heat Affected Zone

<sup>7</sup> Kumar

<sup>1</sup> High Power Ultrasonic waves

<sup>2</sup> Density

<sup>3</sup> Noise

<sup>4</sup> Siddiq

داده‌اند [۱۹]. لوتنس<sup>۸</sup> و همکاران، مدول الاستیک و مقاومت فشاری خمیر سیمان یا بتن را از دامنه یک موج آلتراسونیک منعکس شده تخمین زدند [۲۰]. اخیراً از امواج آلتراسونیک با قدرت زیاد برای مخلوط کردن بتن در بهبود پیش پردازش استفاده شده است [۲۱-۲۲]. لیو<sup>۹</sup> و همکاران، از امواج آلتراسونیک برای ارتقا کارایی حذف کلرید الکتروشیمیایی (ECR) بدون افزایش چگالی جریان استفاده کردند تا بتواند زمان روشن شدن کلی را کاهش دهد، تا باعث کاهش مصرف برق و خسارت مواد ناشی از الکتریسیته شوند. آنها دریافتند که امواج آلتراسونیک نه تنها می‌توانند باعث تخلیه یون‌های کلرید شوند، بلکه روند انفعال میله‌های فولادی را نیز تقویت می‌کنند [۲۳]. تکنیک‌های جدیدی مانند امواج آلتراسونیک توان زیاد (PUS) در حال حاضر برای بهبود هیدراتاسیون مواد سیمانی و تقویت اثر جایگزینی مواد مکمل سیمانی در دست بررسی است. از این نظر، گنجیان و همکاران، ساز و کارهای احتمالی مربوط به اثرات PUS را به‌عنوان یک روش برای تقویت سینتیک هیدراتاسیون سیمان روی سیمان پرتلند و مخلوط‌های باینری بیان نمودند [۲۴-۲۵]. در این تحقیق امواج توان زیاد آلتراسونیک به‌عنوان یک عامل کمکی در تراکم سازی بتن، بکار گرفته شده است.

با توجه به جدید بودن روش استفاده از امواج آلتراسونیک در بحث تراکم‌سازی بتن، پارامترهای مجهولی نظیر مدت زمان اعمال امواج و توان مورد نیاز، وجود دارند که در این تحقیق تلاش بر آن است تا این پارامترهای مجهول در راستای افزایش تراکم بتن، معلوم گردند. برای این منظور، بعد از انجام چند آزمایش اولیه، بتن با مقاومت فشاری ۲۵۰ کیلوگرم بر سانتیمترمربع که بسیار متداول در صنعت بتن می‌باشد به‌عنوان مقاومت ثابت در آزمون‌ها تعیین شد. همچنین، فرکانس مبدل آلتراسونیک، ۲۰ کیلوهرتز (که بالاتر از حد شنوایی انسان می‌باشد) و توان‌های مختلف در نظر گرفته شده است. در نهایت، اثر امواج توان زیاد فراصوتی به منظور افزایش مقاومت فشاری و بهبود خواص مکانیکی بتن بررسی شده است.

فلزات در طول فرآیند پرس گرم کمک می‌نماید. از نکات برجسته تحقیق می‌توان به این موضوع اشاره کرد که در زمینه فرآیند پرس گرم با استفاده از امواج آلتراسونیک می‌توان در درجه حرارت‌های پایین‌تر به فشردگی مورد نظر دست یافت. همچنین، این تحقیق نشان می‌دهد بکارگیری امواج ارتعاشی آلتراسونیک در فرآیندهای پرس گرم به بهبود همگنی ساختار و چگالی بیشتر در فلزات تهیه شده به روش متالورژی پودر نیز منجر می‌شود [۱۲]. در طول دو دهه اخیر، بسیاری از محققان در مورد کاربرد امواج آلتراسونیک کم قدرت در اندازه‌گیری خواص مکانیکی و فیزیکی بتن تحقیق کردند که برخی از آخرین تحقیقات در اینجا بیان می‌شود.

در این رابطه، وی و ژواند<sup>۱</sup>، روش تجزیه و تحلیل متغیر با زمان را در پردازش داده‌های آزمایش آلتراسونیک سازه بتنی معرفی کردند [۱]. قوش<sup>۲</sup> و همکاران، سعی در ایجاد رابطه بین سرعت پالس امواج آلتراسونیک (UPV) و مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمر داشت. نتایج نشان داد که رابطه بین UPV و مقاومت فشاری بتن به طور قابل توجهی تحت تأثیر سن و غلظت فعال کننده قلیایی است [۱۴]. شن<sup>۳</sup> و همکاران، در رابطه بین انقباض اتوژن و سرعت موج آلتراسونیک HSC تقویت شده با الیاف مطالعه نمودند. نتایج آنها نشان داد با افزایش درصد حجم الیاف، انقباض اتوژن و سرعت امواج آلتراسونیک در بتن کاهش می‌یابد [۱۵]. هونگ<sup>۴</sup> و همکاران، مقاومت فشاری را با توجه به سن سازه بتونی با استفاده از روش سرعت پالس آلتراسونیک تخمین زد [۱۶]. لی<sup>۵</sup> با استفاده از تست سرعت پالس آلتراسونیک، مدل جدیدی را برای تخمین زمان تنظیم و مقاومت در برابر فشار که شامل تغییر در شرایط بتن در سنین اولیه است، ارائه داد [۱۷]. سریرماتسو<sup>۶</sup> و همکاران، به صورت تئوری و تجربی تأثیر حالت‌های موج هدایت طولی بر خوردگی حفره ای را مورد مطالعه قرار دادند تا مراحل خاص خوردگی را شناسایی کند [۱۸]. چنا<sup>۷</sup> و همکاران، یک رویکرد مبتنی بر کوبه‌ای جدید غیر مخرب، برای شناسایی حفره‌های سطح زیرین در ساختارهای لوله ای فولادی پر از بتن (CFST) ارائه

<sup>6</sup> Sriramadasu

<sup>7</sup> Chena

<sup>8</sup> Lootens

<sup>9</sup> Liu

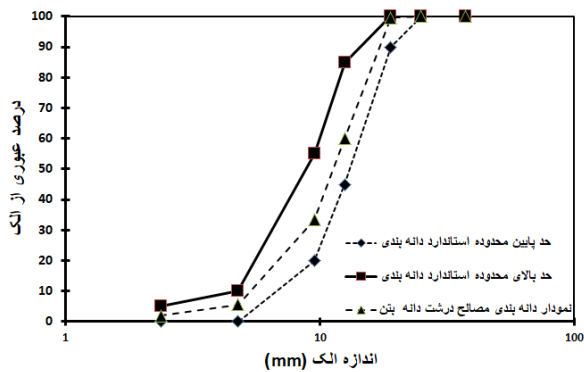
<sup>1</sup> Xuand and Wei

<sup>2</sup> Ghosh

<sup>3</sup> Shen

<sup>4</sup> Hong

<sup>5</sup> Lee



شکل ۲- منحنی دانه بندی سنگ دانه درشت مصرفی در بتن

از آنجایی که معمولاً در محاسبات مربوط به طرح اختلاط بتن از وزن مخصوص سنگ دانه‌ها در حالت اشباع با سطح خشک استفاده می‌شود. بنابراین، در این تحقیق آزمایشگاهی وزن مخصوص شن و ماسه مصرفی بتن در حالت اشباع با سطح خشک مطابق استانداردهای شماره ۴۹۸۰ و ۴۹۸۲ سازمان ملی استاندارد تعیین شده است [۲۷-۲۸]. وزن مخصوص در حالت اشباع با سطح خشک برای مصالح درشت دانه ۲۴۴۹ کیلوگرم بر متر مکعب و برای مصالح ریزدانه ۲۳۸۱ کیلوگرم بر متر مکعب تعیین شد.

### ۲-۱-۲- سیمان

سیمان مصرفی در انجام این تحقیق آزمایشگاهی، سیمان تیپ ۲ کارخانه آبیگ قزوین انتخاب و مشخصات شیمیایی و فیزیکی آن و مناسب بودن آن‌ها برای انجام این تحقیق در جداول (۱ و ۲) ارائه شده است.

### ۲-۱-۳- آب

آب مورد استفاده در ساخت نمونه‌های بتنی این تحقیق، آب آشامیدنی، فاقد بو و مزه مشخص، صاف و تمیز بوده است که مطابق ضوابط پذیرش آب مصرفی در بتن در مبحث نهم مقررات ملی ساختمان ایران می‌توان از آن در بتن استفاده نمود.

### ۲-۲- دستگاه ترانسدیوسر

برای ایجاد فرکانس و توان یاد شده، می‌بایست از مبدل آلتراسونیک استفاده نمود. این مبدل باید به گونه‌ای طراحی شود که ارتعاشات فقط به صورت طولی ایجاد شود. معمولاً برای دستیابی به ارتعاشات طولی از نرم‌افزارهای تحلیل اجزای محدود نظیر آباکوس و انسیس استفاده می‌شود. شکل (۳) شماتیکی را

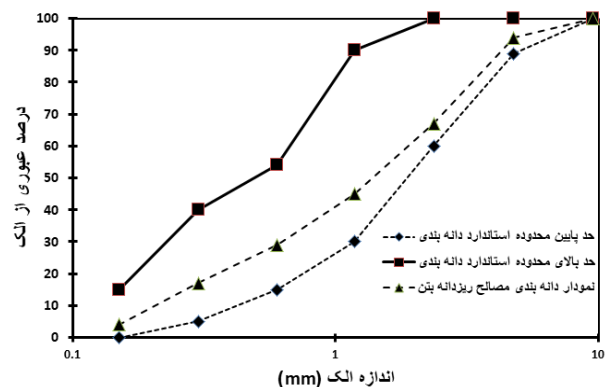
## ۲- مشخصات مواد و تجهیزات

### ۲-۱- مشخصات مصالح مصرفی در بتن

#### ۲-۱-۱- سنگ دانه‌ها

سنگ دانه‌های استفاده شده در تهیه نمونه‌های بتنی جهت انجام این تحقیق آزمایشگاهی، از معادن شهریار تهیه شده است که به منظور تعیین مشخصات سنگ دانه‌های مصرفی در بتن، آزمایش دانه بندی و آزمایش تعیین وزن مخصوص در حالت اشباع با سطح خشک ((s.s.d) بر روی شن و ماسه مطابق ضوابط و دستورالعمل‌های سازمان ملی استاندارد مطابق استاندارد شماره ۴۹۷۷ سازمان ملی استاندارد ایران [۲۶] انجام گرفت و نتایج آن در طرح اختلاط بتن مورد استفاده قرار گرفت.

برای این منظور نمونه‌برداری از دپو شن و ماسه مطابق استاندارد شماره ۱۱۲۶۷ سازمان ملی استاندارد ایران انجام و سپس نمونه‌ها را در دمای  $5 \pm 110^{\circ}\text{C}$  تا رسیدن به وزن ثابت خشک کرده و سپس الک‌های استاندارد را با استفاده از دستگاه مکانیکی برای مدت کافی (حدود ۱۰ دقیقه) تکان داده، سپس جرم مواد مانده روی هر الک را با استفاده از ترازوی با دقت ۰/۱ گرم تعیین گردید. پس از آن درصدهای مانده روی هر الک، درصد تجمعی مانده روی هر الک و درصد تجمعی عبور کرده از هر الک مشخص گردید. منحنی دانه بندی شن و ماسه مصرفی در شکل‌های (۱) و (۲) ارائه شده است.



شکل ۱- منحنی دانه بندی سنگ دانه ریز مصرفی در بتن

همانطور که در شکل‌های ۱ و ۲ مشخص است، سنگ دانه‌های مصرفی مورد استفاده در این تحقیق در محدوده استاندارد واقع شده است و ضوابط آیین نامه برای مصرف در بتن را اقرار می‌نمایند. لازم به ذکر است که حداکثر اندازه سنگ دانه درشت مصرفی در بتن ۱۲/۵ میلیمتر و مدول نرمی مصالح ریزدانه ۳/۴۲ است.

تأثیر امواج توان زیاد فراصوتی در...

نشان می‌دهد که در آن سعی شده است اجزاء توسط نرم افزار انسیس طوری طراحی شوند که تنها موج طولی وجود داشته باشد.

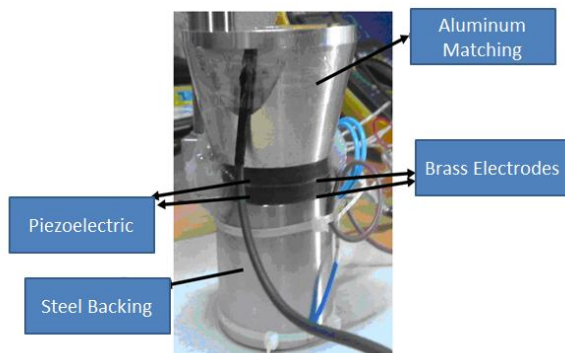
جدول ۱- مشخصات شیمیایی سیمان مصرفی

عنوان	انقباض اتوکلاو (%)		زمان گیرش (دقیقه)		سطح مخصوص (cm <sup>2</sup> /gr)	مقاومت فشاری (kg/cm <sup>2</sup> )		
	اولیه	نهایی	۳ روزه	۷ روزه		۲۸ روزه		
مقدار مجاز	< ۰/۸	> ۴۵	< ۳۶۰	> ۲۸۰۰	> ۳۱۵			
مقدار در سیمان	۰/۲۱	۱۵۳	۲۱۲	۳۰۸۱	۴۹۲	۳۳۳	۲۰۸	

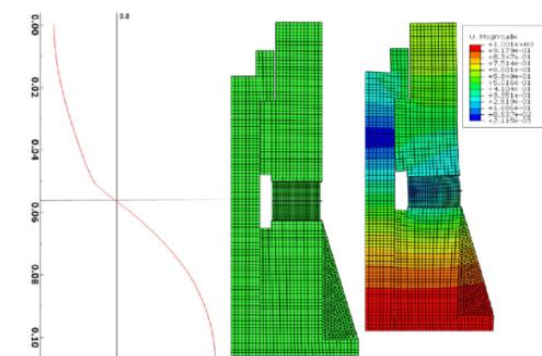
جدول ۲- مشخصات فیزیکی سیمان مصرفی

عنوان	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	MgO	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
درصد مجاز	-	< ۳	< ۵	فاقد محدودیت	< ۶	< ۶	> ۲۰ اختیاری	محدودیت	-	-	< ۸	-
درصد در سیمان	۰/۳۷	۱/۸۹	۳/۲۲	۶۲/۲۸	۳/۸۶	۴/۷۶	۲۰/۷۹	۰/۸۶	۵۲/۵۹	۲۰/۰۳	۷/۱۶	۱۰/۸۷

بر سانتیمتر مربع و حداکثر اندازه سنگ‌دانه درشت ۱۲/۵ میلیمتر بر اساس استاندارد B.S<sup>۱</sup> طرح و جزئیات آن در جدول (۳) ارائه شده است.



شکل ۴- اجزاء مبدل آلتراسونیک



شکل ۳- طراحی ابعاد اجزاء ترانسدیوسر آلتراسونیک در نرم افزار ANSYS

این ترانسدیوسر قادر به تولید امواج توان زیاد (ماکزیمم ۱ کیلو وات) در فرکانس تشدید ۲۰ کیلو هرتز است. این مبدل از اجزاء مولد ارتعاش از جنس PZT، الکتروود برنجی، قطعه تطبیق آلومینیومی، پشت بند فولادی و پیچ دو سر رزوه برای اتصال و تحت بار قراردادن آن‌ها تشکیل شده است که در شکل (۴) نشان داده شده است.

### ۳- روش انجام آزمون

#### ۳-۱- ساخت و عمل آوری آزمون‌ها

##### ۳-۱-۱- طرح اختلاط بتن

در این تحقیق آزمایشگاهی، بتنی با مقاومت فشاری ۲۵۰ کیلوگرم

#### ۳-۱-۲- ساخت آزمون‌ها

قبل از شروع آزمون‌ها ابتدا برای تعیین توان مورد نیاز برای ترانسدیوسر آلتراسونیک، به این صورت عمل شد که تعدادی پیش تست در توان‌های ۲۰۰، ۴۰۰، ۶۰۰، ۸۰۰ و ۱۰۰۰ وات، و زمان‌های تابش امواج ۹۰، ۶۰ و ۳۰ ثانیه انجام گرفت. نتایج نشان دادند که توان‌های کمتر از ۱۰۰۰ وات، و زمان تابش امواج کمتر از ۶۰ ثانیه، تأثیری ندارد. همچنین زمان‌های بیشتر از ۶۰ ثانیه به دلیل اشباع شدن

<sup>۱</sup> British Standards

اثر امواج آلتراسونیک تأثیری در فشرده تر کردن بتن ندارند. صرفاً زمان بیشتر تابش تنها باعث افزایش تلفات انرژی و حتی ممکن باعث آب‌انداختگی بتن تازه شود. بنابراین توان ۱۰۰۰ وات و زمان تابش امواج ۶۰ ثانیه مبنای عمل در تست‌های اصلی قرار گرفت. فرآیند ساخت تمامی آزمون‌ها مطابق با استاندارد شماره ۲-۱۶۰۸ سازمان استاندارد ایران انجام پذیرفته است [۲۹].

جدول ۳- طرح مخلوط بتن مورد استفاده در تحقیق

طرح	حداکثر اندازه سنگ‌دانه (mm)	سیمان (kg)	آب (kg)	نسبت آب به سیمان	شن (kg)	ماسه (kg)	مدول نرمی
طرح B.S	۱۲/۵	۴۰۵	۲۴۳	۰/۶	۶۴۲	۱۰۶۰	۳/۴۲

استفاده شود. همچنین، سطح آزمون‌ها بلافاصله بعد از بازکردن قالب‌ها به وسیله آب تمیز شستشو داده شد تا هرگونه مواد رها ساز باقی مانده از سطح آزمون‌ها حذف شود. سپس همه آزمون‌ها تا زمان انجام آزمایش، در حوضچه عمل‌آوری نگه‌داری شدند. تصاویری از نحوه عمل‌آوری آزمون‌های بتنی و قرارگیری در حوضچه آب در شکل (۶) ارائه شده است.



شکل ۵- تصاویری از مراحل ساخت آزمون‌های مکعبی تحت تأثیر امواج



شکل ۶- تصاویری از نحوه عمل‌آوری آزمون‌های بتنی و قرارگیری آنها در حوضچه آب

به منظور انجام این تحقیق آزمایشگاهی تعداد ۲۱ نمونه مکعبی با ابعاد ۱۰ سانتیمتر تهیه گردید. از این تعداد ۷ آزمون به روش استاندارد تهیه شد که تراکم آنها توسط میله فولادی با سطح مقطع دایره‌ای شکل با قطر تقریبی ۱۶ میلی‌متر و طول تقریبی ۶۰۰ میلی‌متر که هر دو سر آن گرد است، انجام پذیرفت. برای این منظور بتن در سه لایه در قالب‌ها ریخته شد و هر لایه توسط اعمال ۲۵ ضربه متراکم شد. پس از تراکم هر لایه، به آرامی با چکش به سطوح خارجی قالب ضربه زده شد تا حفره‌های به جا مانده از میله تراکم برطرف شوند [۲۹].

تراکم ۷ آزمون تنها با استفاده از تابش امواج آلتراسونیک به مدت ۶۰ ثانیه در هر لایه و تراکم ۷ آزمون با استفاده از هر دو روش و به صورت ترکیبی انجام پذیرفت به عبارت دیگر علاوه بر تراکم به وسیله میله استاندارد، تابش امواج نیز در هر لایه انجام پذیرفت. از هر روش نمونه‌گیری، ۳ آزمون در سن ۷ روزگی، ۳ آزمون در سن ۲۸ روزگی جهت انجام آزمایش تعیین مقاومت فشاری مورد استفاده قرار گرفت و یک آزمون به‌عنوان نمونه شاهد تا سن ۹۰ روزگی نگهداری شد. شکل (۵) تصاویری از مراحل ساخت و کوبش توسط آلتراسونیک را در آزمون‌های مکعبی ۱۰ سانتیمتری را نشان می‌دهد.

### ۳-۱-۳- عمل‌آوری آزمون‌ها

پس از قالب‌گیری، آزمون‌ها به مدت ۲۴ ساعت درون قالب نگه‌داشته شده و در این مدت آزمون‌ها از هرگونه شوک، لرزش و از دست دادن آب هیدراسیون محافظت و در دمای  $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$  نگه‌داری شدند. سپس آزمون‌ها از قالب خارج و تا قبل از لحظه آزمون، در آب در دمای  $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$  عمل‌آوری شدند. در تهیه آزمون‌ها، سعی شد از روغن رها ساز کمتری در قالب‌ها

### ۳-۲- تعیین مقاومت فشاری آزمون‌ها

آزمون‌های عمل‌آوری شده در سنین ۷ و ۲۸ روزگی مورد آزمایش مقاومت فشاری قرار گرفتند. این آزمایش مطابق با ضوابط استاندارد شماره ۳-۱۶۰۸ سازمان ملی استاندارد ایران انجام گرفت. به این صورت که آزمون‌ها پس از اتمام زمان عمل‌آوری از حوضچه عمل‌آوری خارج شده و قبل از قراردادن آزمون‌ها در دستگاه آزمون، رطوبت اضافی از سطوح آنها پاک و آزمون‌ها

فویل آلومینیومی دیگر گذاشته می‌شد تا آب جذب بتن درون ظرف نشود. سپس پر کردن قالب‌ها در یک مرحله انجام می‌گرفت. نتایج نشان دادند که در صورت استفاده از توان ۱۰۰۰ وات، روی فویل آلومینیومی تعدادی سوراخ مشاهده می‌شود. این امر در توان‌های کمتر از ۱۰۰۰ وات مشاهده نمی‌شد. دلیل ایجاد سوراخ روی فویل آلومینیومی، تشکیل پدیده کاویتاسیون و ترکیدن حباب‌های هوا به واسطه وجود لایه آب در کف ظرف است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که عمق نفوذ در توان ۱۰۰۰ وات به اندازه ارتفاع قالب‌هاست. اما به منظور مقایسه با روش استاندارد (کوبش با میله در سه لایه) از ترانسدیوسر در سه لایه استفاده می‌شد که و عملاً از عمق نفوذ موثر ترانسدیوسر استفاده نمی‌شد. بعد از انجام این سه مرحله (تعیین مقاومت مناسب بتن، توان و زمان بهینه تابش امواج آلتراسونیک و در نهایت تعیین عمق نفوذ مؤثر) آزمون‌های اصلی انجام شد. نتایج حاصل از انجام آزمایش مقاومت فشاری آزمون‌های مکعبی در سنین ۷ و ۲۸ روزگی در جداول (۴) و (۵) و مقایسه نتایج برای حالت‌های متفاوت تهیه آزمون‌ها در شکل (۷) ارائه شده است. با توجه به نمودارهای شکل (۷) می‌توان ادعان داشت که استفاده از امواج توان زیاد فراصوتی به منظور متراکم سازی آزمون‌های بتنی در مقایسه با روش استاندارد تهیه آزمون‌ها به نتایج تقریباً یکسان در مقاومت فشاری بتن منجر شده است که این موضوع نشان می‌دهد، استفاده از امواج توان زیاد فراصوتی به منظور متراکم سازی بتن می‌تواند جایگزین روش‌های متعارف متراکم سازی بتن (استفاده از ویبراتور) شود. همچنین نتایج نشان می‌دهد که استفاده از امواج توان زیاد فراصوتی به عنوان یک عامل کمکی در متراکم سازی بتن منجر به کسب مقاومت‌های فشاری بیشتری در آزمون‌ها، در مقایسه با آزمون‌های تهیه شده به روش استاندارد گردیده است. دلیل این اتفاق می‌تواند به‌خاطر این مساله باشد که امواج توان زیاد فراصوتی توانایی ویریه کردن با فرکانس بسیار زیاد را دارند و می‌توانند به حرکت ذرات درون بتن تازه در فضاهای خالی کمک کنند. در واقع امواج فراصوتی با حرکت درون بتن تازه، اصطکاک بین ذرات را کاهش داده و به سر خوردن آن‌ها روی هم کمک می‌کند تا فضاهای خالی بهتر پر شود. همچنین امواج می‌توانند به خروج حباب‌های هوای درون بتن کمک کنند تا بتن فشرده تر شده و در نهایت این فشردگی باعث کاهش جذب آب می‌شود.

به‌گونه‌ای در دستگاه آزمون قرار گرفتند تا بار، عمود بر جهت قالب‌گیری اعمال و آزمون‌ها درست در مرکز فک زیرین دستگاه قرار داده شد. نرخ ثابت بارگذاری در محدوده  $(0.6 \pm 0.2) \text{ Mpa/s}$  انتخاب و بار بدون شوک بر آزمون‌ها اعمال شد.

#### ۴- نتایج

قبل از شروع آزمون‌ها ابتدا تعدادی آزمایش اولیه برای تعیین دو موضوع انجام گرفت. اول، پیدا نمودن مقاومت مناسب بتن برای انجام تحقیق، دوم، تعیین توان بهینه برای متراکم سازی و سوم تعیین عمق نفوذ موثر امواج آلتراسونیک.

در گام اول و در جهت تعیین مقاومت مناسب بتن، مقاومت‌های ۲۵۰، ۳۰۰ و ۳۵۰ کیلوگرم برسانتیمتر مربع و بر اساس استاندارد B.S در نظر گرفته شد و برای هر مقاومت تعداد ۳ نمونه ساخته شد و اثر امواج آلتراسونیک روی آنها بررسی شد. نتایج نشان دادند که هرچه مقاومت بتن بیشتر باشد، اثر امواج آلتراسونیک کمتر می‌شود. در واقع درشت شدن اندازه‌های شن و ماسه به‌عنوان سدی در برابر عبور امواج عمل کرده و راندمان را پایین می‌آورند. بنابراین برای دیدن اثر امواج آلتراسونیک می‌بایست، مقاومت با اندازه شن و ماسه کوچکتر انتخاب گردد. بنابراین در این تحقیق مقاومت با مقاومت فشاری ۲۵۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع در ادامه آزمایش‌ها در نظر گرفته شد.

در گام دوم، تعیین توان مورد نیاز برای ترانسدیوسر آلتراسونیک، مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور، تعدادی پیش تست در توان‌ها و زمان‌های مختلف تابش امواج انجام گرفت. نتایج نشان دادند که توان‌های کمتر از ۱۰۰۰ وات، و زمان تابش امواج کمتر از ۶۰ ثانیه، تاثیری ندارد. همچنین زمان‌های بیشتر از ۶۰ ثانیه به دلیل اشباع شدن اثر امواج آلتراسونیک تاثیری در فشرده تر کردن بتن ندارند. صرفاً زمان بیشتر تابش تنها باعث افزایش تلفات انرژی و حتی ممکن باعث آب‌انداختگی بتن تازه شود. بنابراین توان ۱۰۰۰ وات و زمان تابش امواج ۶۰ ثانیه مبنای عمل در تست‌های اصلی قرار گرفت.

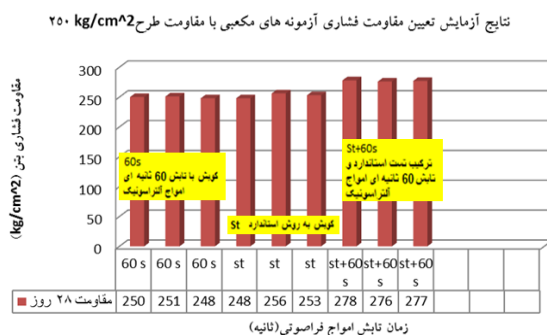
در گام سوم، عمق نفوذ تأثیر امواج بررسی شد. برای این منظور در کف ظرف قالب‌گیری بتن، یک فویل نازک آلومینیومی قرار داده می‌شد و روی آن مقدار کمی آب ریخته می‌شد و سپس یک

جدول ۴- نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه های بتنی مکعبی ۱۰ سانتیمتری با مقاومت فشاری طرح  $250 \text{ kg/cm}^2$ ، در سن ۷ روز

میانگین	مقاومت فشاری نمونه $(\text{kg/cm}^2)$			میانگین	وزن نمونه $(\text{kg})$			روش تراکم
	نمونه ۳	نمونه ۲	نمونه ۱		نمونه ۳	نمونه ۲	نمونه ۱	
۱۷۷	۱۷۷	۱۷۹	۱۷۴	۲/۲۲۶	۲/۲۳۰	۲/۲۳۰	۲/۲۲۰	استاندارد
۱۹۵	۱۹۵	۱۹۴	۱۹۶	۲/۲۳۳	۲/۲۳۰	۲/۲۳۰	۲/۲۴۰	استاندارد+ آلتراسونیک
۱۷۵	۱۷۴	۱۷۶	۱۷۵	۲/۲۲۶	۲/۲۲۰	۲/۲۲۰	۲/۲۴۰	آلتراسونیک ۶۰ ثانیه

جدول ۵- نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه های بتنی مکعبی ۱۰ سانتیمتری با مقاومت فشاری طرح  $250 \text{ kg/cm}^2$ ، در سن ۲۸ روز

میانگین	مقاومت فشاری نمونه $(\text{kg/cm}^2)$			میانگین	وزن نمونه $(\text{kg})$			روش تراکم
	نمونه ۳	نمونه ۲	نمونه ۱		نمونه ۳	نمونه ۲	نمونه ۱	
۲۵۲	۲۵۳	۲۵۶	۲۴۸	۲/۲۲۶	۲/۲۲۰	۲/۲۳۰	۲/۲۳۰	استاندارد
۲۷۷	۲۷۷	۲۷۶	۲۷۸	۲/۲۳۶	۲/۲۴۰	۲/۲۳۰	۲/۲۴۰	استاندارد+ آلتراسونیک
۲۵۰	۲۴۸	۲۵۱	۲۵۰	۲/۲۲۶	۲/۲۳۰	۲/۲۲۰	۲/۲۳۰	آلتراسونیک ۶۰ ثانیه



شکل ۷- مقایسه نتایج مقاومت فشاری با مقاومت طرح  $250 \text{ kg/cm}^2$  در سنین ۷ و ۲۸ روز

در حدود ۱۵۰۰ وات را تامین می نمود، در حدود ۵۰ میلیون ریال و با احتساب هزینه مربوط به ژنراتور آلتراسونیک، حدود ۱۰۰ میلیون ریال هزینه در بر داشت. از طرفی، هزینه خرید یک دستگاه ویراتور برقی با توان ۲ اسب بخار ( $1/5 \text{ kw}$ ) که دارای توان مشابه با دستگاه ترانسدیوسر باشد حدود ۱۵ میلیون ریال در زمان انجام آزمون ها بود.

به منظور بررسی اقتصادی تحقیق، هزینه های انجام آزمایش های انجام شده، مورد تحلیل قرار گرفت. هزینه ها در جدول (۶) برای متراکم سازی یک متر مکعب بتن در مقایسه با روش استفاده از ویراتورهای مرسوم داخل در کشور آورده شده است. هزینه ساخت ترانسدیوسر مورد استفاده در تحقیق که ابعادی در حدود  $20 \times 20$  سانتیمتر و توانی

جدول ۶- مقایسه اقتصادی استفاده از امواج آلتراسونیک با روش متراکم سازی مرسوم

روش متراکم سازی	هزینه ساخت یا خرید دستگاه (میلیون ریال)	هزینه نیروی انسانی (میلیون ریال)	هزینه کل (میلیون ریال)
استفاده از ویربره برقی	۱۲	۰/۷	۱۲/۷
استفاده از امواج آلتراسونیک	۱۰۰	۰/۷	۱۰۰/۷

روش های متراکم سازی معمول منجر به حصول تراکم مناسب بتن و کیفیت بالا نمی گردد. دوم، در خط تولید بتن پیش ساخته که تیراژ تولید بالا باشد تا هزینه سربار و تجهیزات سرشکن شده و استفاده از این روش توجیه اقتصادی پیدا کند. در آخر نکته بسیار مهم این است که این روش عاری از آلودگی صوتی است و می تواند

بنابراین، در خصوص بررسی اقتصادی این تکنولوژی باید عنوان کرد، هزینه اولیه ساخت تجهیزات فراصوتی نسبت به روش ویربره برقی بالاتر است. بنابراین، استفاده از این تکنولوژی در دو صورت پیشنهاد می گردد. اول، استفاده در بتن ریزی مقاطع بتنی با تراکم آرماتور بالا یا مقاطع با شکل پیچیده که معمولاً در آنها استفاده از



## ۶- مراجع

- [1] Claisse P., A.; "Chapter 26 - Production of durable concrete," in Civil Engineering Materials, P. A. Claisse, Ed. Boston: Butterworth-Heinemann, pp. 275-286, 2016
- [2] Navarrete I., Lopez M.; "Understanding the relationship between the segregation of concrete and coarse aggregate density and size," Construction and Building Materials, vol. 149, pp. 741-748, 2017.
- [3] Banfill P., Teixeira M., Craik R.; "Rheology and vibration of fresh concrete: Predicting the radius of action of poker vibrators from wave propagation," Cement and Concrete Research, vol. 41, no. 9, pp. 932-941, 2011.
- [4] Howes R., Hadi M., South W.; "Concrete strength reduction due to over compaction," Construction and Building Materials, vol. 197, pp. 725-733, 2019.
- [5] edini R., Abdullah A., Alizadeh Y.; "Ultrasonic assisted hot metal powder compaction," Ultrasonics Sonochemistry, vol. 38, no. Supplement C, pp. 704-710, 2017.
- [6] ASM Metals Handbook "Nondestructive Evaluation and Quality Control". 1989.
- [7] Siddiq A., El Sayed T.; "Ultrasonic-assisted manufacturing processes: Variational model and numerical simulations," Ultrasonics, vol. 52, no. 4, pp. 521-529, 2012.
- [8] Kuo K., Tsao C.; "Rotary ultrasonic-assisted milling of brittle materials," Transactions of Nonferrous Metals Society of China, vol. 22, pp. 793-800, 2012.
- [9] Nategh M., Razavi H., Abdullah A.; "Analytical modeling and experimental investigation of ultrasonic-vibration assisted oblique turning, part I: Kinematics analysis," International Journal of Mechanical Sciences, vol. 63, no. 1, pp. 1-11, 2012.
- [10] Fartashvand V., Abdullah A., Ali Sadough Vanini S.; "Effects of high power ultrasonic vibration on the cold compaction of titanium," Ultrasonics Sonochemistry, vol. 36, no. Supplement C, pp. 155-161, 2017.
- [11] Kumar S., Wu C., Padhy G., Ding W.; "Application of ultrasonic vibrations in welding and metal processing: A status review," Journal of Manufacturing Processes, vol. 26, no. Supplement C, pp. 295-322, 2017.
- [12] Abedini R., Abdullah A., Alizadeh Y.; "Ultrasonic hot powder compaction of Ti-6Al-4V," Ultrasonics Sonochemistry, vol. 37, 2017.
- [13] Xuand J., Wei H.; "Ultrasonic Testing Analysis of Concrete Structure Based on S Transform", journal of shock and vibration, 2019.

در صورت استفاده به حفظ سلامتی کاربران در بخش متراکم سازی کمک شایانی نماید.

## ۵- نتیجه گیری

در این تحقیق آزمایشگاهی، که به منظور، معرفی روشی نوین و سازگار با محیط زیست و همراستا با سیاست بین المللی توسعه پایدار و در جهت حفظ منابع طبیعی جهان و حذف آلودگی صوتی ناشی از عملیات ویبره زنی و رعایت استاندارد های نوفه انجام پذیرفت، استفاده از امواج توان زیاد آلتراسونیک در متراکم سازی بتن تازه و تأثیر آن بر میزان مقاومت فشاری بتن مورد بررسی قرار گرفت.

نتایج اولیه نشان دادند که با کاهش اندازه ذرات شن و ماسه، بررسی امواج آلتراسونیک در بتن قابل توجه است. همچنین، نتایج بدست آمده نشان داد که، تابش امواج آلتراسونیک بر بتن تازه در مدت زمان بهینه ۶۰ ثانیه، با ایجاد ویبره مناسب و خروج هوا از بتن، فرصت رسیدن به یک تراکم مناسب را برای بتن فراهم می آورد. نتایج بدست آمده از این تحقیق نشان داد که، امواج توان زیاد آلتراسونیک به تنهایی و به عنوان عامل متراکم سازی بتن، می توانند جایگزین متراکم کننده های متداول بتن گردند اما افزایش مقاومت فشاری در بتن را در مقایسه با متراکم کننده های متعارف (ویبراتورها) به همراه نخواهد داشت. در حالی که استفاده از امواج توان زیاد فراصوتی به عنوان یک عامل کمکی در بحث متراکم سازی بتن تازه، افزایش مقاومت فشاری بتن به میزان ۱۰ درصد را به همراه خواهد داشت. در خصوص بررسی اقتصادی این تکنولوژی باید عنوان کرد، هزینه اولیه ساخت تجهیزات آلتراسونیک نسبت به روش ویبره برقی بیشتر است. بنابراین، استفاده از این تکنولوژی یا در بتن ریزی مقاطع بتنی با تراکم آرماتور زیاد یا مقاطع با شکل پیچیده که معمولاً در آنها استفاده از روش های متراکم سازی معمول منجر به حصول تراکم مناسب بتن و کیفیت بیشتر نمی شود، پیشنهاد می شود و یا اینکه در خط تولید بتن پیش ساخته که تیراژ تولید بالاست، استفاده گردد تا هزینه سربار و تجهیزات سرشکن شود و توجیه اقتصادی پیدا کند. در آخر نکته بسیار مهم این است که این روش عاری از آلودگی صوتی است و می تواند در صورت استفاده به حفظ سلامتی کاربران در بخش متراکم سازی کمک شایانی نماید.

- "Application of power ultrasound to cementitious materials: Advances, issues and perspectives", journal of Materials & Design, Vol 160pp. 503-513, 2018.
- [25] Salvador R., Cavalaro S., Segura I., Hernández M., Ranz J., Figueiredo A.; "Relation between ultrasound measurements and phase evolution in accelerated cementitious matrices", Mater. Des., 113, pp. 341-352, 2017.
- [26] Iranian National Standardization organization (INSO 4977, 1<sup>st</sup>-Revision 2015)-Aggregate-Sieve Analysis of fine and coarse aggregates-Test method.
- [27] Iranian National Standardization organization (INSO 4980, 2<sup>nd</sup>-Revision 2018)-Aggregate-Determination of density, relative density (Specific gravity) and water absorption of fine aggregates-Test method.
- [28] Iranian National Standardization organization (INSO 4982, 2<sup>nd</sup>-Revision 2017)-Aggregate-Determination of density, relative density (Specific gravity) and water absorption of coarse aggregates-Test method.
- [29] Iranian National Standardization organization (INSO 1608-2, 1<sup>st</sup> edition 2015)-Hardened concrete-part2: Making and curing specimens for strength tests.
- [14] Ghosh R., Sagar P., Sunil A., Gupta K., Kumar S.; "Estimation of geopolymers concrete strength from ultrasonic pulse velocity (UPV) using high power pulser", Journal of Building Engineering, Vol 16,pp. 39-44, 2018.
- [15] Shen D., Wen C., Zhu P., Wu Y., Yuan J.; "Influence of Barchip fiber on early-age autogenous shrinkage of high strength concrete", journal of Construction and Building Materials, Vol 256,pp. 119-223 2020.
- [16] Hong S., Yoon S., Kim J., Lee C., Kim S., Lee Y.; "Evaluation of Condition of Concrete Structures Using Ultrasonic Pulse Velocity Method", Appl. Sci., 10(2), 706, 2020.
- [17] Lee T., Lee J.; "Setting time and compressive strength prediction model of concrete by nondestructive ultrasonic pulse velocity testing at early age", Construction and Building Materials, Vol. 252, 119027, 2020.
- [18] Sriramadasu R., Banerjee S., Lu Y.; "Sensitivity of longitudinal guided wave modes to pitting corrosion of rebars embedded in reinforced concrete", Construction and Building Materials, Vol 239, 117855, 2020.
- [19] Chena D., Montano V., Huoa L., Fana S., Song G.; "Detection of subsurface voids in concrete-filled steel tubular (CFST) structure using percussion approach", Construction and Building Materials, Vol 262, 119761, 2020.
- [20] Lootens D., Schumacher M., Liard M., Jones S., Bentz D., Ricci S., Meacci V.; "Continuous strength measurements of cement pastes and concretes by the ultrasonic wave reflection method", Construction and Building Materials, Vol 242, 117902, 2020.
- [21] Christiane R.; "Einfluss von Power-Ultraschall auf das Fließ- und Erstarrungsverhalten von Zementsuspensionen", Tagungsband der 17. Internationalen Baustofftagung ibausil, Hrsg. Finger-Institut für Baustoffkunde, Bauhaus-Universität Weimar, S. 1 – 0259 – 1 - 0264.
- [22] Christiane R.; "Einfluss von Power-Ultraschall auf das Fließ- und Erstarrungsverhalten von Zementsuspensionen", Tagungsband der 17. Internationalen Baustofftagung ibausil, Hrsg. Finger-Institut für Baustoffkunde, Bauhaus-Universität Weimar, S. 1 – 0259 – 1 – 0264.
- [23] Liu Q., Song Z., Cai H., Zhou A., Wang W., Jiang L., Liu Y., Zhang Y., Xu N.; "Effect of Ultrasonic Parameters on Electrochemical Chloride Removal and Rebar Repassivation of Reinforced Concrete", journal of Materials, vol 12, 2774, 2019.
- [24] Ganjian E., Ehsani A., Mason T., Tyrer M.;

## Effect of High power ultrasonic-assisted in increasing compressive strength of concrete

Saber Saffar \*

Assistant Professor, Faculty of Engineering, IRIB University, Tehran, Iran.

Seyed Mohsen Karimi

M.Sc., Department of Engineering and Construction Management, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Majid Safehian

Assistant Professor, Department of Engineering and Construction Management, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

### Abstract

Today, staying in economic markets depends on maintaining the quality and cost of production due to the intense competition of producers. It has also led governments to take tougher approaches to improve the environmental situation of industries. Therefore, the use of new technologies that leads to maintaining or increasing product quality and reducing costs without harming the environment will be desirable. Today, the use of high-power ultrasonic waves, due to the lack of noise pollution, has been highly regarded by various industries to improve engineering processes. The effectiveness of these waves in the manufacturing and production industries, such as reducing machinery, increasing surface smoothness, grinding metals during freezing, etc., can also be the motivation for its use in the construction industry. Therefore, the widespread use of high-power ultrasonic waves in various fields of engineering and the identification of the positive effects of these waves on the properties of materials and materials is the reason for the present study. For this purpose, for the first time in this study, the use of high ultrasonic power waves with different powers, different times, and a frequency of 20 kHz in concrete compaction and its effect on concrete compressive strength has been investigated. The results of this study show that the use of ultrasonic high-power waves as a complementary process in the compaction of fresh concrete will increase the compressive strength of concrete by up to 10%.

**Keywords:** Concrete density, Concrete Compressive strength, High power ultrasound Frequency, Noise pollution.

---

\* Corresponding Author: saffar@iribu.ac.ir

