

شناسایی آسیب در نمونه‌های ملات سیمانی با تحلیل تبدیل موجک نتایج آزمون غیرمخرب اولتراسونیک

ابوالفضل فقیهی^۱؛ حامد ملاداودی^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک سنگ، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

۲- دانشیار مکانیک سنگ، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۱۴ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۲۹

(*نویسنده مسئول: davoodi@aut.ac.ir)

چکیده

در بسیاری از مطالعات پیشین در حوزه ارزیابی غیرمخرب مصالح سیمانی، تمرکز اصلی بر اندازه‌گیری سرعت پالس امواج فراصوت بوده و تحلیل سیگنال عمدتاً به صورت کیفی یا در سطح کلی انجام شده است. در حالی که انرژی سیگنال‌های اولتراسونیک در باندهای فرکانسی مشخص با استفاده از ابزارهای موجک، تاکنون تحلیل کمی نشده است. این تحقیق به بررسی استفاده از آزمایش غیرمخرب فراصوتی بر شناسایی عوارض و نواقص در نمونه‌های ملات‌سیمان با طرح اختلاط‌های مختلف می‌پردازد. در این تحقیق، نمونه‌های ملات‌سیمان با محتوای سیمان (CC) متغیر مورد تحلیل قرار گرفتند تا رابطه بین ترکیب مواد، سرعت موج و زمان عبور بررسی شود. سیگنال‌های اولتراسونیک با استفاده از تبدیل موجک گسسته (DWT) و تبدیل بسته موجک (WPT) پردازش شدند تا توزیع انرژی در باندهای فرکانسی مورد ارزیابی قرار گیرد. نتایج نشان داد که انرژی نسبی در بازه فرکانسی سالم در نمونه‌های سالم ۹۵/۵ درصد و در نمونه‌های آسیب‌دیده ۸۰/۵۵ درصد است، در حالی که انرژی در بازه فرکانسی آسیب‌دیده از ۲/۴۲ درصد به حدود ۱۱/۲۶ درصد افزایش یافته است. همچنین، افزایش محتوای سیمان تا حدود ۲۰ درصد موجب بهبود همگنی نمونه‌ها شد، به طوری که سرعت پالس اولتراسونیک از ۴۰۰۷/۶۲ متر بر ثانیه در نمونه CC10 به ۹۷۶۸/۵ متر بر ثانیه در نمونه CC20 افزایش یافت. نوآوری این پژوهش در ترکیب روش اولتراسونیک با تحلیل انرژی موجک در باندهای فرکانسی و بررسی کمی تأثیر درصد سیمان بر دقت تشخیص آسیب است، که امکان شناسایی دقیق آسیب‌ها حتی در نمونه‌های کم‌مقاومت را فراهم می‌سازد. این پژوهش بر پتانسیل پردازش سیگنال برای شناسایی مؤثر نواقص و بررسی همگنی مواد در نمونه‌های ملات‌سیمان با محتوای سیمان متغیر تأکید می‌کند.

آزمایش غیرمخرب اولتراسونیک، مصالح شبه‌سنگی سیمان‌شده، ترک، تبدیل موجک گسسته، تبدیل بسته موجک، انرژی نسبی فرکانس

واژگان کلیدی

۱- مقدمه

[۱]. با توجه به اهمیت ایمنی و هزینه‌های بالای تعمیر، ارزیابی وضعیت بتن، به‌ویژه در سازه‌های قدیمی، ضروری است [۲]. روش‌های آزمون بتن به دو دسته مخرب و غیرمخرب تقسیم می‌شوند [۳]. روش‌های مخرب، اگرچه دقیق هستند،

بتن یکی از پرکاربردترین مصالح ساختمانی است که به دلیل مقاومت بالا، هزینه تولید پایین و تنوع گسترده، در ساخت سازه‌هایی مانند سدها، پل‌ها و ساختمان‌ها استفاده می‌شود

است، اهمیت زیادی دارد و بر استحکام و یکپارچگی ساختار تأثیر می‌گذارد. در مقابل، استفاده بیش از حد سیمان می‌تواند منجر به افزایش هزینه‌ها، کاهش کارایی و بروز مشکلاتی مانند ترک‌خوردگی ناشی از جمع‌شدگی ذرات سیمان شود. به همین دلیل، آگاهی از نسبت دقیق مواد مصرفی برای دستیابی به تعادل میان استحکام، دوام و اقتصادی بودن ضروری است [۱۰].

پژوهش‌های مختلفی نیز نشان داده‌اند که روش‌های غیرمخرب مانند اولتراسونیک ابزاری مؤثر برای ارزیابی تأثیر نسبت ترکیب مواد در نمونه‌های ملات‌سیمانی هستند. این روش‌ها امکان بررسی یکنواختی و شناسایی حفره‌ها و نقص‌های داخلی را بدون نیاز به تخریب سازه فراهم می‌کنند و می‌توانند به بهینه‌سازی ترکیب مواد و بهبود کیفیت نمونه‌های ملات‌سیمانی کمک کنند. پژوهش استلماخ^۵ و همکاران [۱۱] نیز تأکید دارد که انتخاب دقیق نسبت‌های ترکیب مواد به بهبود ویژگی‌های مکانیکی و اقتصادی بتن کمک می‌کند و باعث افزایش کارایی و کاهش هزینه‌ها می‌شود.

امروزه انواع مختلفی از آزمون‌های غیرمخرب ابداع شده‌اند که امکان بازرسی سازه‌های بتنی را بدون آسیب رساندن به این سازه‌ها فراهم می‌کنند. در این بین آزمایش غیرمخرب اولتراسونیک و آزمایش نشرآوایی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشند. در روش اولتراسونیک می‌توان با تحلیل تغییرات خواص مکانیکی (سرعت یا مدت زمان عبور سیگنال ارسالی) نقص‌های داخلی و مشکلات ساختاری احتمالی را شناسایی کرد. یکی از چالش‌ها در این زمینه، شناسایی آسیب در سازه‌های بتنی ضخیم به دلیل کاهش دامنه سیگنال با افزایش فاصله فرستنده و گیرنده می‌باشد. استخراج ویژگی‌های مختلف سیگنال اولتراسونیک (مانند دامنه، فرکانس، فاز و مدت زمان عبور) و بررسی آن‌ها در فضای زمان-فرکانس، می‌تواند به تشخیص دقیق‌تر آسیب‌ها کمک کند [۱۲].

ابزارهایی مانند تبدیل فوریه^۶ (FFT)، تبدیل فوریه کوتاه‌مدت^۷ ($STFT$) و تبدیل موجک^۸ (WT) برای تحلیل این

به دلیل تخریب سازه، هزینه اجرایی بالا و زمان‌بر بودن، محدودیت‌هایی دارند [۴]–[۶]. در مقابل، روش‌های غیرمخرب^۱ (NDT) به دلیل سرعت بالا، هزینه کمتر و امکان بررسی جامع، به عنوان یک روش کارآمد در ارزیابی وضعیت نمونه‌های ملات‌سیمانی بدون آسیب به ساختار آن شناخته شده‌اند [۴].

این روش‌ها توانایی اندازه‌گیری دقیق پارامترهای کلیدی نمونه‌های ملات‌سیمانی مانند مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته، شناسایی ترک‌ها، خوردگی آرماتور و چسبندگی میان نمونه‌های ملات‌سیمانی و آرماتور را دارند و می‌توانند در طول عمر سازه وضعیت آن را تحت نظر داشته باشند [۱،۴]. با وجود محدودیت‌هایی نظیر تأثیر جنس بتن و شرایط محیطی بر دقت نتایج [۱۱]، روش‌های غیرمخرب با پیشرفت‌های اخیر، به ابزاری مؤثر تبدیل شده‌اند [۷].

از جمله مطالعات مهم در این زمینه می‌توان به پژوهش لورنزی^۲ و همکاران [۸] اشاره کرد که از شبکه‌های عصبی مصنوعی برای تفسیر داده‌های اولتراسونیک بهره گرفتند.

همچنین، حناچی^۳ و گوشه^۴ [۹] در مطالعه‌ای مروری، به بررسی توانمندی روش UPV در تخمین مقاومت بتن در محل پرداختند و محدودیت‌ها و مزایای آن را تحلیل کردند. در این پژوهش از نمونه‌های ملات‌سیمان استفاده شده که شامل ترکیبی از ماسه، سیمان و آب بوده و فاقد سنگدانه‌های درشت است. پس از عمل‌آوری، این مصالح ساختاری مقاوم و مشابه به سنگ طبیعی خواهند داشت. از مزایای این ترکیب می‌توان به وزن کمتر و دانه‌بندی دقیق‌تر نسبت به بتن‌های معمولی اشاره کرد که منجر به شباهت خواص فیزیکی و مکانیکی آن به سنگ طبیعی می‌شود.

نسبت ترکیب مواد مصرفی در نمونه‌های ملات‌سیمانی، نقشی اساسی در تعیین دوام و عملکرد آن‌ها دارد. این نسبت نه تنها بر مقاومت فشاری و کششی تأثیر می‌گذارد، بلکه رفتار نمونه‌های ملات‌سیمانی در برابر شرایط محیطی مانند تغییرات دما، رطوبت و خوردگی را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد. به‌ویژه مصرف بهینه سیمان، که عامل اصلی پیوند در بتن

¹ Non-Destructive Testing

² Lorenzi

³ Hannachi

⁴ Guetteche

⁵ Stel'makh

⁶ Fast Fourier Transform

⁷ Short Time Fourier Transform

⁸ Wavelet Transform

می‌توانند دقت شناسایی آسیب‌ها را افزایش دهند. به طور کلی، این تحقیقات نشان‌دهنده پتانسیل بالای فناوری اولتراسونیک در تشخیص آسیب‌های سازه‌های بتنی هستند و استفاده از تکنیک‌های پیشرفته پردازش سیگنال می‌تواند بهبود قابل توجهی در دقت و سرعت ارزیابی سلامت سازه‌ها ایجاد کند.

مطالعات پیشین در زمینه تبدیل موجک پیشرفت‌های قابل توجهی را نشان داده‌اند. با این حال، بررسی جامع و سیستماتیک استخراج ویژگی‌های سیگنال بر اساس انرژی نسبی فرکانس با استفاده از تبدیل موجک، به‌طور کامل صورت نگرفته است [۱۹]. در این پژوهش به تاثیر میزان سیمان مصرفی در تشخیص عیب در نمونه‌های شبه‌سنگی با استفاده از آزمایش غیرمخرب اولتراسونیک پرداخته می‌شود. سپس نتایج حاصل با استفاده تبدیل موجک گسسته^{۱۵} (*DWT*) و تبدیل بسته موجک^{۱۶} (*WPT*) مورد ارزیابی قرار می‌گیرند تا اطلاعات بیشتری از موج استخراج شوند.

۲- مطالعات تجربی

۲-۱- مشخصات نمونه‌ها

در نخستین مرحله از پژوهش، آزمایش غیرمخرب اولتراسونیک بر روی پنج نمونه ملات سیمانی با محتوای سیمان^{۱۷} (*CC*) متفاوت که در آزمایشگاه تهیه شده‌اند، انجام پذیرفت. شکل ۱ نمای کلی این نمونه‌ها را نشان می‌دهد. نمونه‌ها طبق استاندارد *ASTM C192* به شکل منشوری با ابعاد $12 \times 12 \times 12.5$ سانتی‌متر ساخته شدند. برای تهیه هر نمونه، ابتدا اجزای خشک (ماسه و سیمان) به‌طور کامل در میکسر مخلوط شده و سپس آب به‌صورت تدریجی اضافه گردید. پس از ریختن ملات در قالب، نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط نگهداری شده و سپس از قالب خارج شدند. عمل‌آوری نمونه‌ها به مدت ۲۸ روز در اتاق مرطوب با دمای 20 ± 2 درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی حدود ۹۵٪ انجام گرفت تا خواص مکانیکی و فیزیکی آن‌ها به‌طور کامل توسعه یابد [۲۰].

سیگنال‌ها به کار می‌روند. تبدیل موجک، به ویژه برای سیگنال‌های غیرایستا و نویزی، توانایی تحلیل دقیق ویژگی‌های محلی سیگنال‌ها را دارد [۱۳].

در سال‌های اخیر، استفاده از فناوری اولتراسونیک برای تشخیص آسیب‌های سازه‌های بتنی توجه زیادی را به خود جلب کرده است. این فناوری به دلیل توانایی‌های خود در شناسایی تغییرات در خواص فیزیکی بتن، به‌عنوان یک ابزار مفید در ارزیابی سلامت سازه‌ها مطرح شده است. پژوهشگران متعددی در این زمینه فعالیت کرده‌اند و تکنیک‌های مختلفی برای پردازش و تحلیل سیگنال‌های اولتراسونیک به کار برده‌اند.

در این حوزه، مطالعات تفری^۹ و تارکگن^{۱۰} [۱۴] نمونه‌هایی از کاربردهای این روش‌ها در شناسایی ترک‌های داخلی در بتن ارائه داده‌اند.

همچنین، لورنزی و همکاران [۸] با استفاده از تبدیل *S* به بررسی انتشار امواج در بتن پرداختند و نشان دادند که پردازش سیگنال در بازه‌های فرکانسی به‌صورت هدفمند، می‌تواند اطلاعات دقیق‌تری از وجود آسیب ارائه دهد.

افزون بر این، ژو^{۱۱} و همکاران [۱۵] در یک مرور سیستماتیک در سال ۲۰۲۵، بیان کردند که فناوری‌های اولتراسونیک، از جمله روش‌های مبتنی بر موجک، در حال تبدیل شدن به رویکرد اصلی در شناسایی عیوب بتن در صنعت ساخت‌وساز هستند.

برای مثال، هو^{۱۲} و همکاران [۱۶] با استفاده از تبدیل موجک، توانسته‌اند برای شناسایی ترک‌ها در بتن از سیگنال‌های اولتراسونیک بهره ببرند. همچنین، در ادامه، گریکه^{۱۳} و همکاران [۱۷] نیز با شبیه‌سازی و تحلیل سیگنال‌های اولتراسونیک به تشخیص ترک‌ها و آسیب‌های درونی در بتن پرداخته‌اند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که با پردازش صحیح سیگنال‌ها، می‌توان اطلاعات دقیق‌تری از وضعیت سازه‌ها به دست آورد. همچنین، موختی^{۱۴} و همکاران [۱۸] با استفاده از پردازش سیگنال اولتراسونیک، به شناسایی آسیب‌های داخلی بتن پرداختند و نشان دادند که این روش‌ها

¹⁴ Mukhti

¹⁵ Discrete Wavelet Transform

¹⁶ Wavelet Packet Transform

¹⁷ Cement Content

⁹ Tefera

¹⁰ Tarekegn

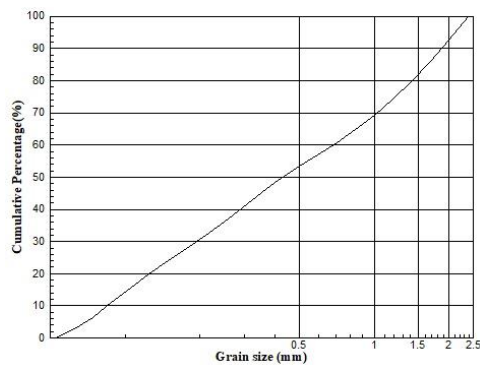
¹¹ Xu

¹² Hu

¹³ Grabke

مطالعات پیشین شو^{۱۸} و وی^{۱۹} [۱۲] و کومار^{۲۰} و همکاران [۲۱] انتخاب شده است که در آن‌ها نیز از حفره‌هایی با قطر ۸ تا ۱۲ میلی‌متر برای ارزیابی عملکرد روش‌های اولتراسونیک استفاده شده است. این ابعاد با در نظر گرفتن اندازه کل نمونه، به گونه‌ای انتخاب شد که ضمن دقت و یکنواختی کلی نمونه، باعث ایجاد تغییر قابل اندازه‌گیری در سیگنال اولتراسونیک شود. بدیهی است که این آسیب‌ها بیانگر ترک‌های طبیعی نیستند، اما امکان ارزیابی قابلیت روش‌های غیرمخرب در شناسایی آسیب‌ها را فراهم می‌کنند.

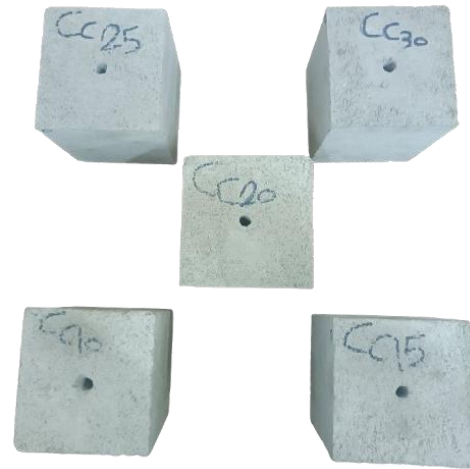
مواد اولیه مورد استفاده در ساخت نمونه‌ها شامل آب شهری، سیمان پرتلند تیپ ۲ و ماسه شسته شده فیروزکوه با مشخصات مطابق با استانداردهای ملی و بین‌المللی، از جمله استاندارد ملی ایران ISIRI-389 و استاندارد ASTM C150 آمریکا، است [۲۲]. منحنی دانه‌بندی ماسه در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲- منحنی دانه‌بندی ماسه مورد استفاده در نمونه‌های CC

۲-۲- فرآیند آزمایش غیرمخرب اولتراسونیک

برای ارزیابی تأثیر ترک بر خواص نمونه‌های ملات‌سیمانی، آزمایش غیرمخرب اولتراسونیک با استفاده از دستگاه *Pundit Lab* مدل ۲۰۱۷ در آزمایشگاه مهندسی مکانیک سنگ دانشگاه صنعتی امیرکبیر انجام شد. نمای کلی دستگاه به همراه تجهیزات جانبی آن در شکل ۳ نشان داده شده است. قبل از انجام آزمایش بر روی نمونه‌های ملات‌سیمانی، کالیبراسیون دقیق دستگاه ضروری است. بدین منظور، پروب‌های دستگاه به طور کامل با گریس مخصوص آغشته شده و سپس به دو سر نمونه کالیبراسیون^{۲۱} متصل شدند.



شکل ۱- نمای از نمونه‌های ملات‌سیمانی با محتوای سیمان متفاوت (CC)

چنانچه در جدول ۱ مشاهده می‌شود، متغیر اصلی در این آزمایش، نسبت آب به سیمان است که در هر یک از نمونه‌ها متفاوت در نظر گرفته شده است.

جدول ۱- مشخصات نمونه‌های ملات‌سیمانی با محتوای

سیمان (CC) متفاوت			
اسم نمونه	آب (%)	سیمان (%)	ماسه (%)
CC10	۱۰	۱۰	۸۰
CC15	۱۰	۱۵	۷۵
CC20	۱۰	۲۰	۷۰
CC25	۱۰	۲۵	۶۵
CC30	۱۰	۳۰	۶۰

این موضوع موجب تفاوت در چگالی نمونه‌ها و میزان تخلخل آنان شده است. چنانچه انتظار می‌رود با افزایش نسبت آب به سیمان، سرعت پالس اولتراسونیک کاهش می‌یابد. افزایش نسبت آب به سیمان و در نتیجه تخلخل بیشتر، موجب پراکندگی بیشتر امواج اولتراسونیک و در نتیجه کاهش سرعت عبور آن‌ها می‌شود. همچنین به منظور بررسی قابلیت سرعت پالس اولتراسونیک در تشخیص آسیب، در مرکز تمامی نمونه‌ها سوراخی استوانه‌ای شکل به قطر ۱ سانتی‌متر ایجاد شد.

قطر ۱ سانتی‌متر برای سوراخ ایجاد شده بر اساس

²⁰ Kumar

²¹ Calibration

¹⁸ Xu

¹⁹ Wei

جدول ۲- تنظیمات اولیه دستگاه اولتراسونیک مطابق با

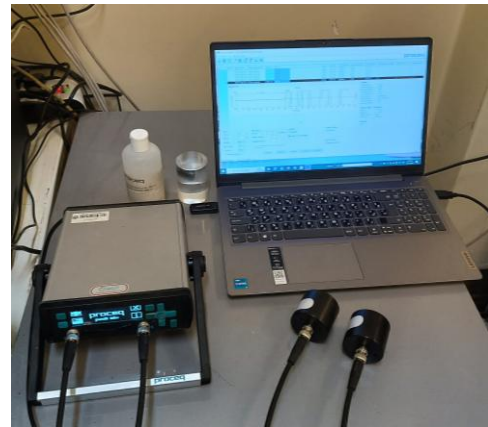
راهنمای کاربر [۲۳]

پارامتر	واحد	متغیر	مقدار تنظیم شده
فرکانس	kHz		۳۷, ۲۴
			۸۲, ۵۴
			۲۰۰, ۱۵۰, ۲۵۰, ۲۲۰, ۵۰۰
عرض پالس	μs	۱-۱۰۰	۹.۳
دامنه	μs	۰.۱-۹۹۹۹	AUTO
وضوح	μs	۰.۱-۱	۰.۱
کالیبراسیون	μs	۱-۱۱۰	۲.۷
میانگین گیری	-	زمان، سیگنال	زمان
ولتاژ تحریک	-	-	۲۵۰, ۱۲۵
			۳۵۰
			۵۰۰, AUTO
سودگیرنده	-	$x, 10x, 1$	AUTO
واحدها	-	ft, m	AUTO
عامل تصحیح	-	۰.۰۷-۱.۳	۱.۰۰

عمق نفوذ کم ایجاد می‌شود. واحد کنترل اصلی سیستم باید دارای وضوح اندازه‌گیری زمان بسیار بالا حداقل ۰.۱ میکرو ثانیه باشد [۳].

در هر نمونه تعدادی آزمایش اولتراسونیک انجام شده است. برای هر نمونه، نقاط آزمایش در یک شبکه منظم و با فواصل برابر تعیین شده‌اند و آزمایش‌های اولتراسونیک در وجه‌های روبروی هم انجام شده است. تعداد نقاط آزمایش برای هر نمونه بیست نقطه (در یک آرایه چهار در پنج) است که مطابق شکل ۴ بر روی نمونه‌ها اجرا شده است. به منظور افزایش دقت و اطمینان از تکرارپذیری نتایج، در هر نقطه از سطح، آزمایش اولتراسونیک ده بار تکرار شد و میانگین نتایج به عنوان مقدار نهایی در نظر گرفته شد.

پس از اتصال پروب‌ها، فرایند کالیبراسیون انجام شد.



شکل ۳- نمای کلی از دستگاه اولتراسونیک

در دستگاه *Pundit Lab 2017* با اندازه گیری ضخامت نمونه و زمان عبور موج، می‌توان سرعت موج عبوری را تعیین کرد. برای تحلیل بهتر پارامترهای سرعت عبوری و زمان عبور موج اخذ شکل سیگنال^{۲۲} ضروری است. برای این کار از نرم‌افزار *Punditlink* استفاده شد. بر مبنای راهنمای کاربر *Pundit Lab*، تنظیمات نرم‌افزار به شرح جدول ۲ تعیین شدند [۲۳].

با توجه به محدودیت دستگاه در ارائه خروجی مستقیم داده‌های سیگنال، از نرم‌افزار *getdataw* برای استخراج داده‌های آماری هر نمودار از جمله دامنه و مدت زمان استفاده شد. در این نرم‌افزار با تعیین چهار نقطه (دو نقطه در امتداد محور x و دو نقطه در امتداد محور y) امکان یافتن مختصات نقاط *Waveform* فراهم شد. تمامی آزمایش‌های اولتراسونیک در این پژوهش مطابق با استانداردهای *EN 12504-4 (Europe)* و *ASTM C597-02 (North America)* انجام پذیرفت [۲۳].

طول موج خیلی زیاد موجب حذف عیوب کوچک می‌شود که منجر به سیگنالی با عمق نفوذ زیاد می‌شود. از سوی دیگر طول موج خیلی کم باعث تضعیف جدی در موج ارسالی می‌شود و در نتیجه سیگنالی با حساسیت زیاد اما با

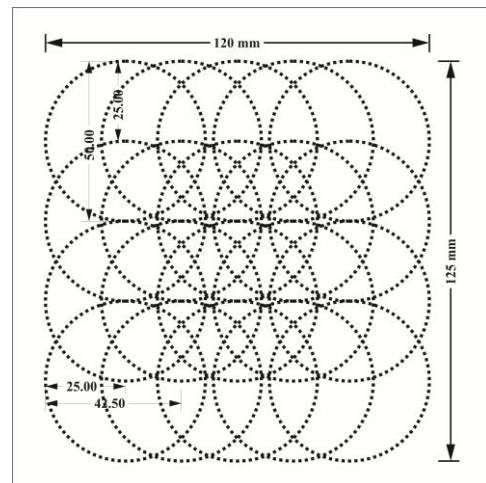
طول پنجره باعث کاهش دقت زمانی و افزایش دقت فرکانسی می‌شود، که این موضوع در تحلیل‌های دقیق زمانی مانند تشخیص آسیب‌ها مشکل‌ساز است. علاوه بر این، انتخاب نوع و طول پنجره می‌تواند تأثیر زیادی بر نتایج تحلیل داشته باشد و برای سیگنال‌هایی با تغییرات فرکانسی سریع، تبدیل فوریه سریع با زمان کوتاه کارایی مطلوبی نداشته باشد.

تبدیل موجک یک ابزار پیشرفته برای تجزیه و تحلیل همزمان سیگنال‌های غیر ثابت در هر دو حوزه زمان و فرکانس است. برخلاف تبدیل فوریه، این روش از توابع موجک پایه استفاده می‌کند که ویژگی‌های سیگنال را با تغییر مقیاس و ترجمه شناسایی می‌کند [۲۴].

ترکیب این پارامترها امکان تجزیه و تحلیل دقیق سیگنال را در مقیاس‌های فرکانس و دوره‌های زمانی مختلف فراهم می‌کند. این ویژگی تبدیل موجک برای شناسایی عیوب ساختاری با استفاده از امواج اولتراسونیک ایده‌آل است. به عنوان مثال، لژاندر^{۲۵} و همکارانش از تبدیل موجک برای تشخیص دقیق عیوب و ناهنجاری‌ها در ساختارهای مواد مرکب بر اساس سیگنال‌های اولتراسونیک استفاده کردند [۲۵]. انتخاب تبدیل موجک مناسب به ویژگی‌های سیگنال استخراج شده بستگی دارد. اگرچه تبدیل موجک پیوسته یک روش کارآمد برای تجزیه و تحلیل همزمان سیگنال‌های غیر ثابت در هر دو حوزه زمان و فرکانس است، اما برای برخی کاربردها محدودیت‌هایی دارد. یکی از اشکالات اصلی آن ناتوانی در طبقه بندی گروه‌های فرکانس بر اساس میزان انرژی در هر سطح است. این ضعف از تجزیه و تحلیل دقیق انرژی سیگنال در سطوح مختلف فرکانس جلوگیری می‌کند و تنها یک تحلیل کیفی از داده‌ها ارائه می‌نماید که ممکن است برای کاربردهایی مانند تشخیص الگوی انرژی یا مطالعه دینامیک سیگنال پیچیده کافی نباشد [۲۶]. به همین دلیل، این پژوهش مبتنی بر استفاده از تبدیل موجک گسسته و تبدیل بسته موجک است.

۳-۱- تبدیل موجک گسسته

تبدیل موجک گسسته نسخه گسسته‌شده تبدیل موجک پیوسته است که با استفاده از مقیاس‌ها و موقعیت‌های دودویی (توان‌های عدد ۲) پیچیدگی محاسبات را کاهش می‌دهد و



شکل ۴- محل تماس پروب با نمونه در طول آزمایش اولتراسونیک

این آزمایش با پروب‌های ۵۴ کیلوهرتز که به صورت مقابل یکدیگر قرار گرفته بودند، انجام شد. براساس مطالعات نایک^{۲۳} و مالهورترا^{۲۴}، این محدوده فرکانس برای به حداقل رساندن تأثیر تغییرات مقاومت بتن در اندازه‌گیری‌ها انتخاب شده است [۲۱]. در این آزمون، پارامترهایی نظیر سرعت موج طولی، زمان عبور موج و شکل موج سیگنال به طور مستقیم اندازه‌گیری شده و نتایج به صورت دیجیتالی در نرم‌افزار *Punditlink* ثبت شده است.

لازم به ذکر است آزمایش سرعت پالس اولتراسونیک در این پژوهش مطابق با استاندارد *ASTM C-597-0* انجام شده است [۲۴].

۳- تبدیل موجک

تبدیل فوریه سریع امکان شناسایی فرکانس‌های مختلف یک سیگنال را فراهم می‌کند، اما قادر به تعیین زمان وقوع اجزای فرکانسی نیست. برای سیگنال‌های غیر ایستا که فرکانس یا دامنه آن‌ها در گذر زمان تغییر می‌کند، استفاده از تبدیل فوریه سریع کافی نبوده و تبدیل فوریه سریع با زمان کوتاه پیشنهاد می‌شود. این روش با اعمال پنجره متحرک روی سیگنال و محاسبه تبدیل فوریه سریع در هر بخش، تحلیل تغییرات فرکانسی در زمان را امکان‌پذیر می‌سازد. با این حال، تبدیل فوریه سریع با زمان کوتاه محدودیت‌هایی دارد؛ افزایش

²⁵ Legendre

²³ Naik

²⁴ Malhotra

می‌شوند:

$$a = 2^{-j} \quad (4)$$

$$b = 2^{-j}k \quad (5)$$

که در آن j مقیاس و k جابه‌جایی موجک در مقیاس‌های توان دو را نشان می‌دهند. در تبدیل موجک گسسته و تبدیل بسته موجک، پارامترهای j (سطح مقیاس) و k (شاخص جابه‌جایی) به تعداد سطوح تجزیه و طول سیگنال بستگی دارد. پارامتر مقیاس j میزان کشش موجک را کنترل می‌کند. در تجزیه موجک دوتایی، j مقادیری از ۰ تا J می‌گیرد، در شرایطی که J حداکثر سطح تجزیه است. حداکثر سطح تجزیه معمولاً بر اساس طول سیگنال انتخاب می‌شود.

$$J = \log_2(N) \quad (6)$$

که در آن N تعداد نقاط داده است. در عمل، بسته به کاربرد، از تعداد کمتری از سطوح (به عنوان مثال، ۳ تا ۶ سطح) استفاده می‌شود. پارامتر جابه‌جایی k تغییرات موجک را کنترل می‌کند. برای هر مقیاس j ، شاخص ترجمه k مقادیر صحیح را می‌گیرد.

$$k = 0, 1, 2, \dots, \frac{N}{2^j} - 1 \quad (7)$$

تعداد تبدیل‌ها با افزایش مقیاس کاهش می‌یابد، زیرا مقیاس‌های بالاتر مربوط به مؤلفه‌های فرکانس پایین‌تر است که جابه‌جایی‌های زمانی کمتری دارند. با جایگزینی معادلات (۴) و (۵) در معادله (۱)، خواهیم داشت.

$$\Psi_{j,k}(t) = \frac{1}{\sqrt{2^{-j}}} \Psi\left(\frac{t-2^{-j}k}{2^{-j}}\right) = 2^{\frac{j}{2}} \times \Psi(2^j t - k) \quad (8)$$

رابطه تبدیل موجک گسسته به شکل زیر بیان می‌شود:

$$DWT(j, k) = C_{f,\psi}(j, k) = \sum_{t \in \mathbb{Z}} f(t) \cdot \Psi_{j,k}(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \cdot \Psi_{j,k}(t) dt \quad (9)$$

اختیار می‌باشد. $\Psi_{j,k}(t)$ تابع موجک مادر است که با مقیاس j و موقعیت k تغییر یافته است. بنابراین، بازسازی سیگنال با تقریب (A) و جزئیات (D) در مراحل مختلف تجزیه (n) در معادله زیر امکان‌پذیر است:

$$f(t) = A_n + \sum_{m \leq n} D_m \quad (10)$$

هر سطح تقریب و جزئیات با مقیاس و انتقال مشخصی از تابع موجک مادر تولید می‌شود و ضرایب $C_{f,\psi}(j, k)$

تحلیل سیگنال را ساده‌تر می‌کند. این روش، سیگنال را به سطوح مختلفی از تقریب (فرکانس پایین) و جزئیات (فرکانس بالا) تجزیه می‌کند که امکان بررسی ویژگی‌های کلی و جزئیات سریع‌تر را فراهم می‌سازد. تبدیل موجک مادر که مبنای تمام تبدیلات موجک است به صورت زیر تعریف می‌شود [۲۵]:

$$\Psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (1)$$

که در آن $\psi(t)$ تابع موجک مادر است که برای تحلیل سیگنال استفاده می‌شود. a پارامتر مقیاس و b پارامتر انتقال است [۲۶]. لازم به ذکر است که در این پژوهش، از تابع موجک دابشی سطح پنج $(db5)$ استفاده شد که معمولاً در تبدیل موجک گسسته و تبدیل بسته موجک استفاده می‌شود. تابع $\psi(t)$ برای تابع موجک دابشی سطح پنج $(db5)$ به طور ضمنی از طریق تابع مقیاس‌بندی و فیلترهای آینه‌ای مربعی مرتبط تعریف می‌شود و یک معادله صریح مشخص ندارد. موجک دابشی سطح پنج $(db5)$ با استفاده از تابع مقیاس آن (که موجک پدر، $\varphi(t)$ نیز نامیده می‌شود) و تابع موجک مرتبط با آن (موجک مادر، $\psi(t)$) تعریف می‌شود. که هر دو این توابع از مجموعه‌ای از ضرایب فیلتراسیون تشکیل شده‌اند که روابط هر یک از این توابع مطابق معادلات ۲ و ۳ می‌باشند.

$$\Phi(t) = \sum_{n=0}^9 h_n \sqrt{2} \phi(2t - n) \quad (2)$$

$$\Psi(t) = \sum_{n=0}^9 g_n \sqrt{2} \phi(2t - n) \quad (3)$$

در معادلات فوق h_n ضرایب مربوط به فیلتر پایین‌گذر و $g_n = (-1)^n h_{9-n}$ می‌باشد که مربوط به ضرایب فیلتر بالاگذر می‌باشد.

در این حالت، ضرایب تبدیل به شکل زیر محاسبه

که در معادله فوق، $C_{f,\psi}(j, k)$ ضرایب موجک گسسته هستند که نشان‌دهنده میزان شباهت بین سیگنال $f(t)$ و موجک مادر $\Psi_{j,k}(t)$ در مقیاس j و موقعیت k می‌باشند. با ضرایب $C_{f,\psi}(j, k)$ می‌توان اطلاعات فرکانسی و زمانی سیگنال را به‌طور هم‌زمان به دست آورد و بخش‌های مختلف سیگنال را با دقت بالایی تحلیل کرد. $f(t)$ سیگنال پیوسته است که در نقاط t نمونه‌برداری شده و به شکل گسسته در

مناسب می‌سازد. با انتخاب مناسب توابع موجک و مقیاس‌بندی، می‌توان از تبدیل موجک گسسته برای حذف نویز، تحلیل سیگنال‌های غیرایستا و فشرده‌سازی داده استفاده کرد [۲۷].

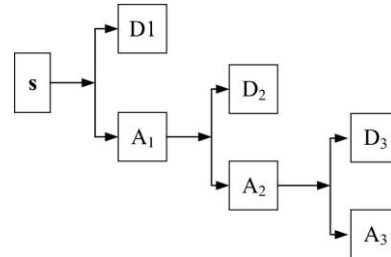
۳-۲- تبدیل موجک بسته (WPT)

تبدیل بسته موجک یک روش پیشرفته است که برای تجزیه و تحلیل دقیق‌تر سیگنال‌ها به کار می‌رود. این روش به طور هم‌زمان هم تقریب و هم جزئیات سیگنال را در سطوح مختلف تجزیه می‌کند، برخلاف تبدیل موجک گسسته که تنها به تحلیل تقریب سیگنال می‌پردازد. این روش بر مبنای معادله (۱۱) محاسبه می‌شود:

$$f(t) = \sum_{m \leq n} A_n + \sum_{m \leq n} D_m \quad (11)$$

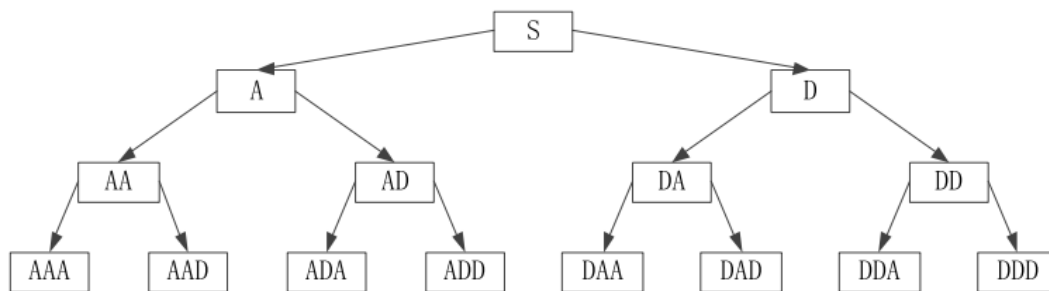
که در آن A_n تقریب و D_m جزئیات سیگنال در سطوح مختلف تجزیه هستند. تبدیل بسته موجک این امکان را فراهم می‌کند که تغییرات فرکانسی دقیق‌تر شناسایی شده و آسیب‌های جزئی سیگنال با دقت بالاتری تحلیل شوند. این ویژگی‌ها آن را به ابزاری قدرتمند برای تجزیه و تحلیل سیگنال‌های پیچیده و داده‌های حجیم تبدیل می‌کند.

محاسبه می‌شوند تا میزان تطابق هر بخش از سیگنال با موجک مادر را نشان دهند. شکل ۵ نشان می‌دهد که ضرایب موجک گسسته از فیلتر کردن سیگنال اصلی با فیلترهای تحلیل پایین‌گذر و بالاگذر به دست می‌آیند. با تکرار این فرآیند برای زیر باندهای حاصل، می‌توان درخت تجزیه تبدیل موجک را ایجاد کرد [۲۵].



شکل ۵- نمودار تجزیه موجک گسسته سه لایه [۲۷]

در مقایسه با روش‌های سنتی مانند تبدیل فوری، تبدیل موجک گسسته توانایی محلی‌سازی در زمان و فرکانس را دارد و می‌تواند تغییرات ناگهانی یا نوسانات خاص سیگنال را شناسایی کند. این ویژگی آن را برای کاربردهایی مانند تشخیص آسیب‌های سازه‌ای، پردازش تصویر و تحلیل صوت



شکل ۶- نمودار تجزیه بسته موجک سه لایه [۲۸]

۴- تحلیل نتایج

در این بخش، تحلیل و مقایسه‌ای میان سیگنال‌های مربوط به قسمت سالم نمونه $CC10$ و سیگنال‌های قسمت آسیب‌دیده در نمونه‌های $CC10$ ، $CC15$ ، $CC20$ ، $CC25$ و $CC30$ انجام شده است. این بررسی با استفاده از تبدیل موجک گسسته و تبدیل بسته موجک انجام شده است تا تفاوت‌ها و شباهت‌های موجود در ویژگی‌های فرکانسی و انرژی نسبی سیگنال‌ها در شرایط سالم و آسیب‌دیده برای درصد اختلاط‌های مختلف مشخص شود. این تحلیل می‌تواند اطلاعات مفیدی درباره تأثیر میزان آسیب و مقدار سیمان مصرفی بر خواص سیگنال ارائه دهد. لازم به ذکر است که برای هر یک از تحلیل‌های

شکل ۶ فرآیند تجزیه بسته موجک را بر روی یک سیگنال اصلی (S) نشان می‌دهد. در این شکل این فرآیند سه بار تکرار شده و در نهایت سیگنال اصلی به هشت باند فرکانسی مختلف تجزیه شده است. هر یک از این باندها، اطلاعات خاصی را در مورد سیگنال اصلی ارائه می‌دهد [۲۸]. یکی از ویژگی‌های مهم تبدیل بسته موجک این است که می‌توان با انتخاب گره‌های فرکانس پایین، نویزهای فرکانس بالا را فیلتر کرده و تنها به اطلاعات ضروری دسترسی پیدا کرد.

نیتین بورود^{۲۸} و چاندرا کیشن^{۲۹} بازه‌ای بین ۳۲ تا ۶۴ کیلوهرتز [۲۹] و راوی کومار^{۳۰} و همکاران بازه ۲۵ تا ۶۰ کیلوهرتز را برای بتن سالم گزارش کرده‌اند [۲۱]. همچنین، جونکای شو^{۳۱} وهای وی^{۳۲} فرکانس‌های ۳۰ تا ۱۰۰ کیلوهرتز را برای بتن سالم پیشنهاد داده‌اند [۱۲].

با توجه به این یافته‌ها، در این پژوهش بازه فرکانس سالم به‌طور کلی ۱۰۰-۲۰ کیلوهرتز در نظر گرفته شد و تحلیل‌های فرکانسی نمونه‌ها با استفاده از تبدیل موجک گسسته و تبدیل بسته موجک انجام گرفت تا بازه فرکانسی دقیق هر نمونه تعیین شود. همچنین با توجه به اینکه سرعت پالس اولتراسونیک در نمونه‌های آسیب‌دیده کمتر از نمونه‌های سالم است [۱۲]، [۲۱] و سرعت امواج در بتن بیشتر از هوا است [۳۰]، انتظار می‌رود فرکانس سیگنال در نواحی سالم بیشتر باشد. بر این اساس، بازه فرکانسی برای نواحی آسیب‌دیده به‌صورت ۲۰-۰ کیلوهرتز در نظر گرفته شده است. همچنین، فرکانس‌های بالاتر از ۱۰۰ کیلوهرتز به‌عنوان نویز در سیگنال‌ها در نظر گرفته شده‌اند [۲۹].

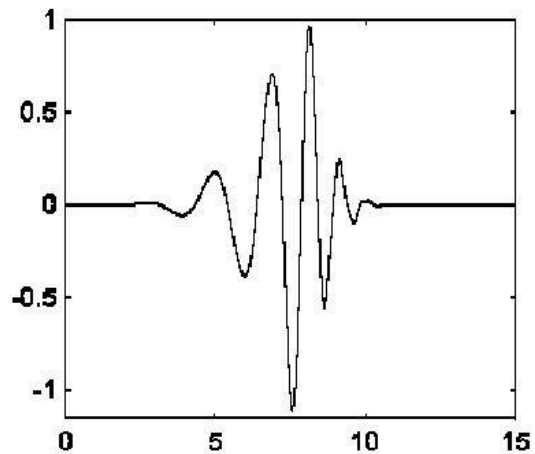
در این پژوهش، تجزیه سیگنال‌ها در پنج سطح انجام شد و از تبدیل موجک گسسته، ۶ زیرباند و از تبدیل بسته موجک، ۳۲ زیرباند استخراج گردید. فاصله فرکانسی زیرباندهای تبدیل موجک گسسته ثابت نیست و برای هر سیگنال متفاوت است، اما در تبدیل بسته موجک، این فاصله حدود ۲۰.۳ کیلوهرتز است که حداکثر فرکانس را تا ۶۵۰ کیلوهرتز پوشش می‌دهد.

۴-۱- تجزیه سیگنال با استفاده از تبدیل موجک

گسسته و تبدیل بسته موجک

در شکل ۸ سیگنال بخش سالم نمونه *CC10* نشان داده شده است که این سیگنال‌ها با استفاده از تبدیل‌های موجک تبدیل موجک گسسته و تبدیل بسته موجک تجزیه و تحلیل شده است.

تبدیل موجک گسسته و تبدیل بسته موجک از تابع دابشی^{۲۷} در سطح ۵ استفاده شده است. سیگنال استخراجی از التراسونیک پس از ورود به نرم افزار متلب براساس تطابق سیگنال با تابع دابشی سطح پنج به دو گروه سیگنال جزئی و اصلی تقسیم می‌شود و این کار برای چهار بار متوالی دیگر بر روی تابع‌های اصلی باقی مانده در هر مرحله انجام می‌شوند تا تمام سطوح مختلف سیگنال جداسازی شوند. شکل ۷ تابع دابشی را نشان می‌دهد.



شکل ۷- تابع دابشی

این انتخاب بدین دلیل می‌باشد که موجک دابشی، به دلیل خاصیت حفظ انرژی و تجزیه‌ی منحصر به فرد سیگنال به اجزای آن، انتخاب مناسبی برای بسیاری از کاربردها است. برای مثال، در پردازش سیگنال‌های اولتراسونیک، موجک دابشی به دلیل قابلیت فشرده‌سازی و حذف نویز، گزینه‌ای بهینه برای تحلیل جزئیات سیگنال‌های پیچیده اولتراسونیک است [۲۷].

در این پژوهش، پروب‌های اولتراسونیک با فرکانس مرکزی ۵۴ کیلوهرتز برای تحلیل نمونه‌های ملات‌سیمانی استفاده شده است. با توجه به مطالعات پیشین، بازه فرکانسی بتن در پژوهش‌های مختلف متفاوت بوده است؛ به‌عنوان مثال،

³⁰ Ravi Kumar

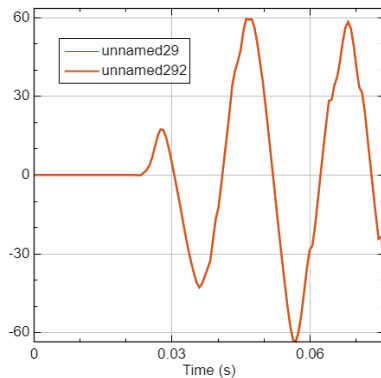
³¹ Juncai Xu

³² Hai Wei

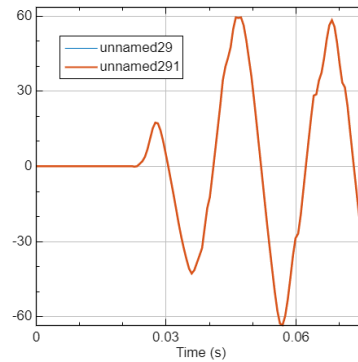
²⁷ Daubechies

²⁸ Nitin Burud

²⁹ Chandra Kishen



(ب)



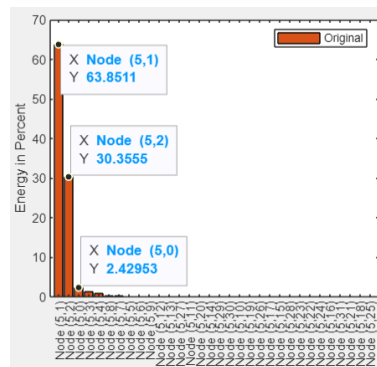
(الف)

	Plot Coefficients	Original Coefficients	Retained Coefficients	Frequencies (Hz)
Node (5,1)	<input checked="" type="checkbox"/>	128	128	2.03e+04 - 4.05e+04
Node (5,2)	<input checked="" type="checkbox"/>	128	128	4.06e+04 - 6.09e+04
Node (5,0)	<input checked="" type="checkbox"/>	128	128	0 - 2.03e+04
Node (5,3)	<input type="checkbox"/>	128	128	6.09e+04 - 8.12e+04
Node (5,4)	<input type="checkbox"/>	128	128	8.12e+04 - 1.02e+05
Node (5,0)	<input type="checkbox"/>	128	128	1.62e+05 - 1.82e+05

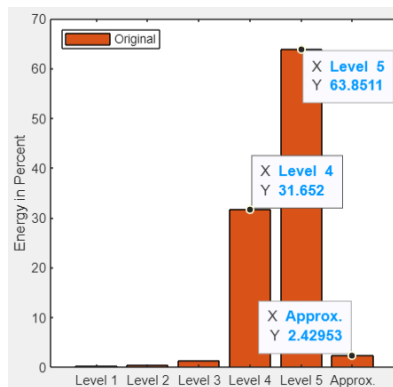
(د)

	Plot Coefficients	Original Coefficients	Retained Coefficients	Frequencies (Hz)
Level 1	<input type="checkbox"/>	128	128	3.25e+05 - 6.5e+05
Level 2	<input type="checkbox"/>	128	128	1.62e+05 - 3.25e+05
Level 3	<input type="checkbox"/>	128	128	8.11e+04 - 1.62e+05
Level 4	<input checked="" type="checkbox"/>	128	128	4.05e+04 - 8.12e+04
Level 5	<input checked="" type="checkbox"/>	128	128	2.03e+04 - 4.06e+04
Approx.	<input checked="" type="checkbox"/>	128	128	0 - 2.03e+04

(ج)



(و)



(ه)

شکل ۸- تجزیه و تحلیل سیگنال بخش سالم نمونه با طرح اختلاط ۱۰ درصد (الف) سیگنال بازسازی شده از DWT، (ب) سیگنال بازسازی شده از WPT، (ج) بازه‌های فرکانسی استخراج شده از DWT، (د) بازه‌های فرکانسی استخراج شده از WPT، (ه) انرژی‌های استخراج شده از هر بازه فرکانسی از DWT و (و) انرژی‌های استخراج شده از هر بازه فرکانسی از WPT

۲.۴۲ درصد می‌باشد که بسیار کم است و نشان‌دهنده سلامت بتن است. تحلیل مشابهی با تبدیل بسته موجک انجام شده است. با توجه به شکل ۸ (د) و (و) بازه فرکانس سالم برای تبدیل بسته موجک بین ۲۰.۳ تا ۶۰.۹ کیلوهرتز است و انرژی نسبی در این بازه فرکانس تقریباً ۹۴.۲ درصد می‌باشد. همچنین، بازه فرکانس آسیب بین ۰ تا ۲۰.۳ کیلوهرتز است و انرژی نسبی آن ۲.۴۲ درصد می‌باشد.

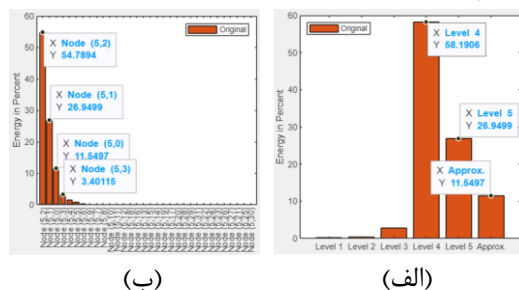
از تحلیل‌های انجام شده می‌توان نتیجه گرفت که تبدیل‌های موجک تبدیل بسته موجک گسسته و تبدیل بسته موجک هر دو در شناسایی بازه فرکانس آسیب‌دیده و محاسبه

با توجه به شکل ۸ (الف) و (ب) مشاهده می‌شود که سیگنال بازسازی شده با استفاده از تبدیل موجک گسسته و تبدیل بسته موجک هر دو هم‌خوانی قابل‌توجهی با سیگنال اصلی دارند. همچنین، در جداول شکل ۸ (ج) و (ه) نشان داده شده است که برای تبدیل بسته موجک گسسته، بازه فرکانس سالم بین ۲۰.۳ تا ۸۱.۷ کیلوهرتز است و انرژی نسبی فرکانس در این بازه تقریباً ۹۵.۵ درصد می‌باشد. این مقدار نشان‌دهنده سهم بالای انرژی در بازه فرکانس سالم است. از طرف دیگر، بازه فرکانس آسیب‌دیده برای تبدیل بسته موجک گسسته بین ۰ تا ۲۰.۳ کیلوهرتز است و انرژی نسبی در این بازه فرکانس تنها

فرکانسی استخراج شده از DWT، (د) بازه‌های فرکانسی استخراج شده از WPT، (ه) انرژی‌های استخراج شده از هر بازه فرکانسی از DWT و (و) انرژی‌های استخراج شده از هر بازه فرکانسی از WPT

با مقایسه شکل ۸ و شکل ۹ نشان می‌دهند که در سیگنال‌های مربوط به بخش آسیب‌دیده، سهم انرژی نسبتی از بازه فرکانسی آسیب نسبت به سیگنال بخش سالم افزایش می‌یابد و این ویژگی امکان شناسایی و تمایز بین بخش‌های سالم و آسیب‌دیده را فراهم می‌کند. علاوه بر این، بررسی و مقایسه نویز سیگنال‌های بخش آسیب‌دیده و سالم نیز تفاوت قابل توجهی را نشان می‌دهد؛ در سیگنال بخش سالم نمونه *CC10* میزان نویز ۳.۳۸ درصد است، در حالی که در سیگنال بخش آسیب‌دیده همین نمونه، میزان نویز به ۸.۱۹ درصد افزایش یافته است.

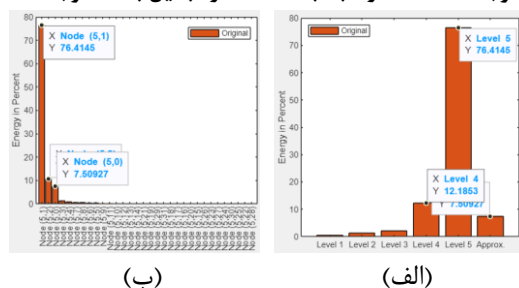
در شکل ۱۰ تا شکل ۱۳، سیگنال‌های مربوط به بخش‌های آسیب‌دیده نمونه‌های *CC25*، *CC20*، *CC15* و *CC30* با تبدیل موجک گسسته و تبدیل بسته موجک تجزیه و تحلیل شده‌اند و سهم انرژی در بازه فرکانس آسیب‌دیده به ترتیب برای نمونه‌های مذکور برابر با ۱۱.۵۴، ۷.۵، ۷.۷۹ و ۷.۵ درصد به دست آمده است.



(ب)

(الف)

شکل ۱۰- میزان انرژی بازه‌های مختلف فرکانسی سیگنال بخش آسیب‌دیده نمونه *CC15* (الف) با استفاده از تبدیل موجک گسسته و (ب) با استفاده از تبدیل بسته موجک



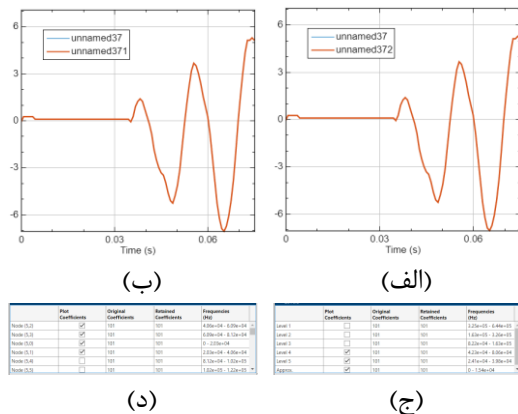
(ب)

(الف)

شکل ۱۱- میزان انرژی بازه‌های مختلف فرکانسی سیگنال

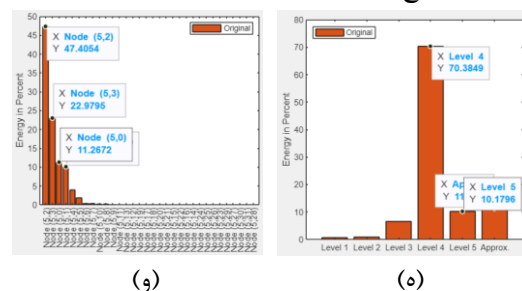
انرژی نسبی فرکانس کاملاً همخوانی دارند. با این حال، تبدیل بسته موجک بازه فرکانس سالم را کاهش می‌دهد اما انرژی محاسباتی آن به طور قابل توجهی کاهش نمی‌یابد. این ویژگی عملکرد برتر تبدیل بسته موجک را در پیش‌بینی بازه فرکانسی مربوط به ناحیه سالم بتن نشان می‌دهد.

در شکل ۹، سیگنال مربوط به بخش آسیب‌دیده نمونه *CC10* نمایش داده شده است. در قسمت (ج) و (ه) شکل ۹ که تحلیل بازه‌های فرکانسی با استفاده از تبدیل موجک گسسته نشان می‌دهد؛ بازه فرکانسی سالم برابر با ۲۴.۱ تا ۸۰.۶ کیلوهرتز است و انرژی نسبی در این فرکانس بازه ۸۰.۵۵ درصد می‌باشد. در مقابل، بازه فرکانسی آسیب برابر با ۰ تا ۱۵.۴ کیلوهرتز است و انرژی نسبی فرکانس در این بازه ۱۱.۲۶ درصد است. همچنین، تحلیل مشابه با تبدیل بسته موجک در قسمت (د) و (و) شکل ۹ نشان می‌دهد که بازه فرکانسی سالم برابر با ۲۰.۳ تا ۸۱.۲ کیلوهرتز است و انرژی نسبی آن فرکانس ۸۰.۵۵ درصد است. بازه فرکانسی آسیب‌دیده نیز برابر با ۰ تا ۲۰.۳ کیلوهرتز بوده و انرژی نسبی فرکانس در این بخش ۱۱.۲۶ درصد می‌باشد.



(د)

(ج)



(و)

(ه)

شکل ۹- تجزیه و تحلیل سیگنال بخش آسیب‌دیده نمونه با طرح اختلاط ۱۰ درصد (الف) سیگنال بازسازی شده از DWT، (ب) سیگنال بازسازی شده از WPT، (ج) بازه‌های

آسیب‌دیده بیشتر است. در مقابل، در نمونه‌های $CC20$ ، $CC25$ و $CC30$ با افزایش مصرف سیمان، سطح انرژی در بخش آسیب‌دیده کاهش می‌یابد. بنابراین، تحلیل انرژی در بازه‌های مختلف فرکانسی سیگنال نمونه‌های ملات‌سیمانی با استفاده از تبدیل‌های موجک گسسته و بسته می‌تواند رویکرد موثری برای ارزیابی و شناسایی بخش‌های سالم و آسیب‌دیده باشد.

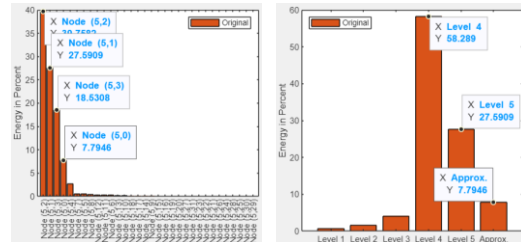
۴-۲- نقشه کانتور سرعت پالس اولتراسونیک

نمونه‌های ملات‌سیمانی

تصویربرداری در بسیاری از حوزه‌ها کاربرد دارد و به‌عنوان ابزاری قدرتمند برای تفسیر داده‌های سیگنال شناخته می‌شود. با این حال، استفاده از تصویربرداری برای ارزیابی سازه‌های بتنی به‌طور گسترده مرسوم نیست [۲۱]. در این پژوهش، خوانش‌های مرتبط با آسیب‌های نمونه‌های ملات‌سیمانی به‌صورت تصویری نمایش داده شدند. تصویر تولیدشده نشان می‌دهد که در چه نقاطی از نمونه ملات‌سیمانی، میزان خوانش‌ها کمتر یا بیشتر است. عدم وجود هرگونه تغییر در تصویر بیانگر همگن بودن نمونه‌های ملات‌سیمانی است.

برای بررسی اولیه، نقشه کانتوری سرعت پالس اولتراسونیک با استفاده از نرم‌افزار متلب طراحی شد. شکل ۱۴، نقشه کانتور سرعت پالس اولتراسونیک پنج نمونه CC را نمایش می‌دهد.

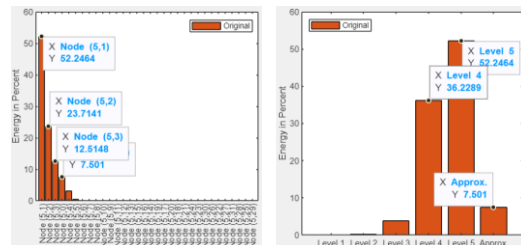
بخش آسیب‌دیده نمونه $CC20$ (الف) با استفاده از تبدیل موجک گسسته و (ب) با استفاده از تبدیل بسته موجک



(ب)

(الف)

شکل ۱۲- میزان انرژی بازه‌های مختلف فرکانسی سیگنال بخش آسیب‌دیده نمونه $CC25$ (الف) با استفاده از تبدیل موجک گسسته و (ب) با استفاده از تبدیل بسته موجک

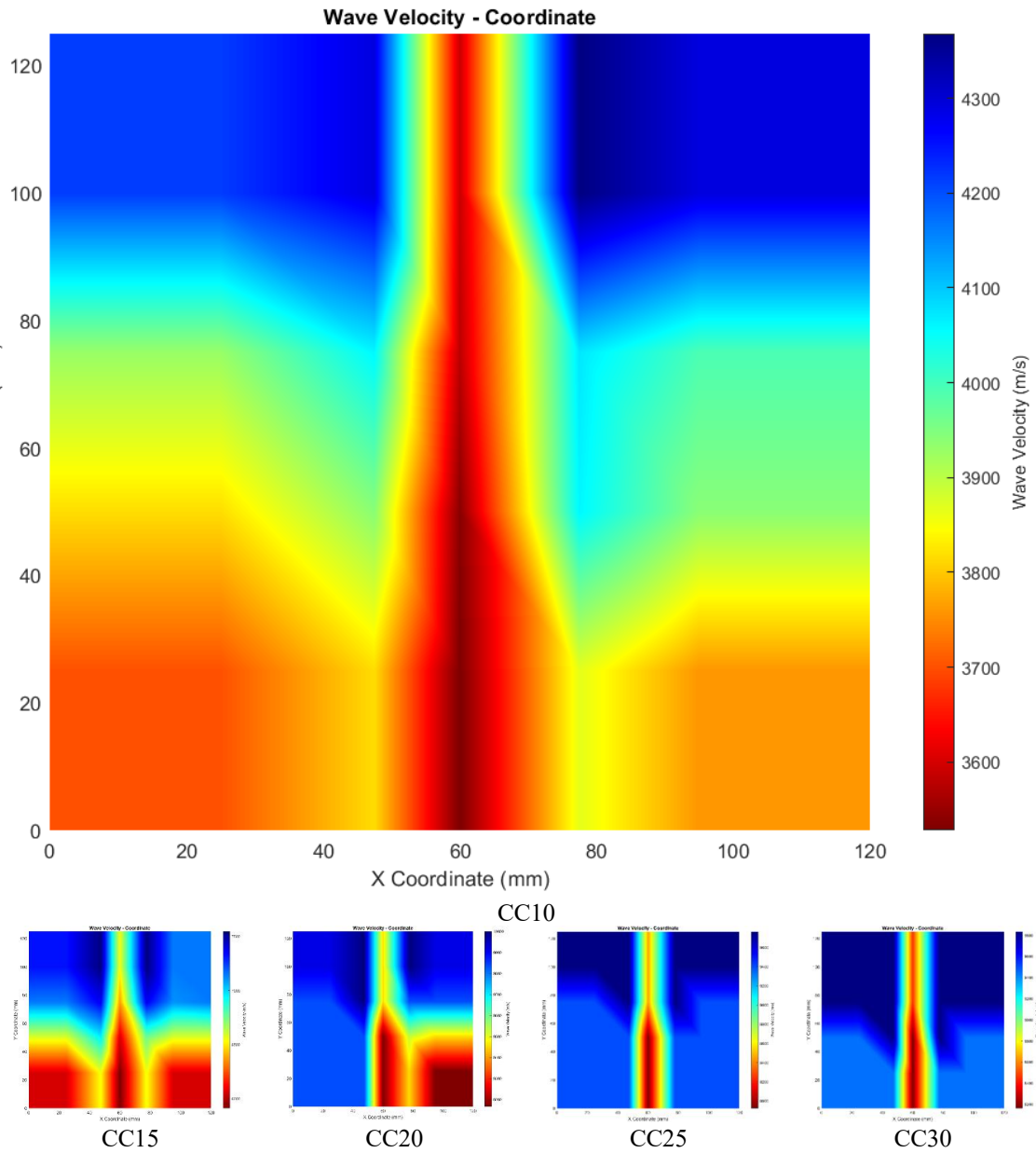


(ب)

(الف)

شکل ۱۳- میزان انرژی بازه‌های مختلف فرکانسی سیگنال بخش آسیب‌دیده نمونه $CC30$ (الف) با استفاده از تبدیل موجک گسسته و (ب) با استفاده از تبدیل بسته موجک

نتایج فوق نشان می‌دهند که در نمونه‌های $CC10$ و $CC15$ ، به دلیل مصرف کمتر سیمان، سهم انرژی در بخش



شکل ۱۴- نقشه کانتور سرعت پالس اولتراسونیک پنج نمونه CC با حفره به قطر ۱ سانتی‌متر.

همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، به دلیل ابعاد بزرگ قطر حفره (حدود ۱ سانتی‌متر)، آسیب‌ها حتی با تغییر در طرح اختلاط نمونه‌های CC نیز به‌وضوح قابل شناسایی و اندازه‌گیری هستند. در جدول ۳ میانگین سرعت در بخش‌های سالم و آسیب‌دیده نشان داده شده است.

جدول ۳- مقایسه میانگین سرعت در بخش سالم و بخش آسیب‌دیده و تغییرات سرعت پالس اولتراسونیک در بخش سالم پنج عدد نمونه CC با حفره به قطر ۱ سانتی‌متر

اسم نمونه	AVH (m/s)	AVD (m/s)	AVH-AVD	DVH (m/s)	وضعیت بررسی
	میانگین سرعت بخش سالم	میانگین سرعت بخش آسیب‌دیده		تغییرات سرعت در بخش سالم	
CC10	۴۰۰۷.۶۲	۳۵۵۹.۲۵	۴۴۸.۳۷۵	۶۶۸	
CC15	۶۹۱۳.۸۷	۶۲۲۲	۶۹۱.۸۷۵	۱۴۸۷	
CC20	۹۷۶۸.۵	۹۳۱۰	۴۵۸.۵	۸۳۳	
CC25	۹۵۳۹.۵	۸۱۹۰.۵	۱۳۴۹	۳۶۴	
CC30	۹۶۹۰.۹۴	۸۳۰۷	۱۳۸۳.۹۳۷	۳۸۸	

سیمان مصرفی کم کارآمد نمی‌باشد چراکه ناهمگنی نمونه تاثیر قابل توجهی بر سرعت پالس اولتراسونیک دارد. بنابراین ضروری است با استفاده از تبدیل‌های موجک پیوسته و گسسته سیگنال پالس اولتراسونیک تجزیه و تحلیل شوند.

۴-۳- نقشه کانتور میزان انرژی نسبی در فرکانس سالم با تحلیل انجام شده با تبدیل موجک

گسسته

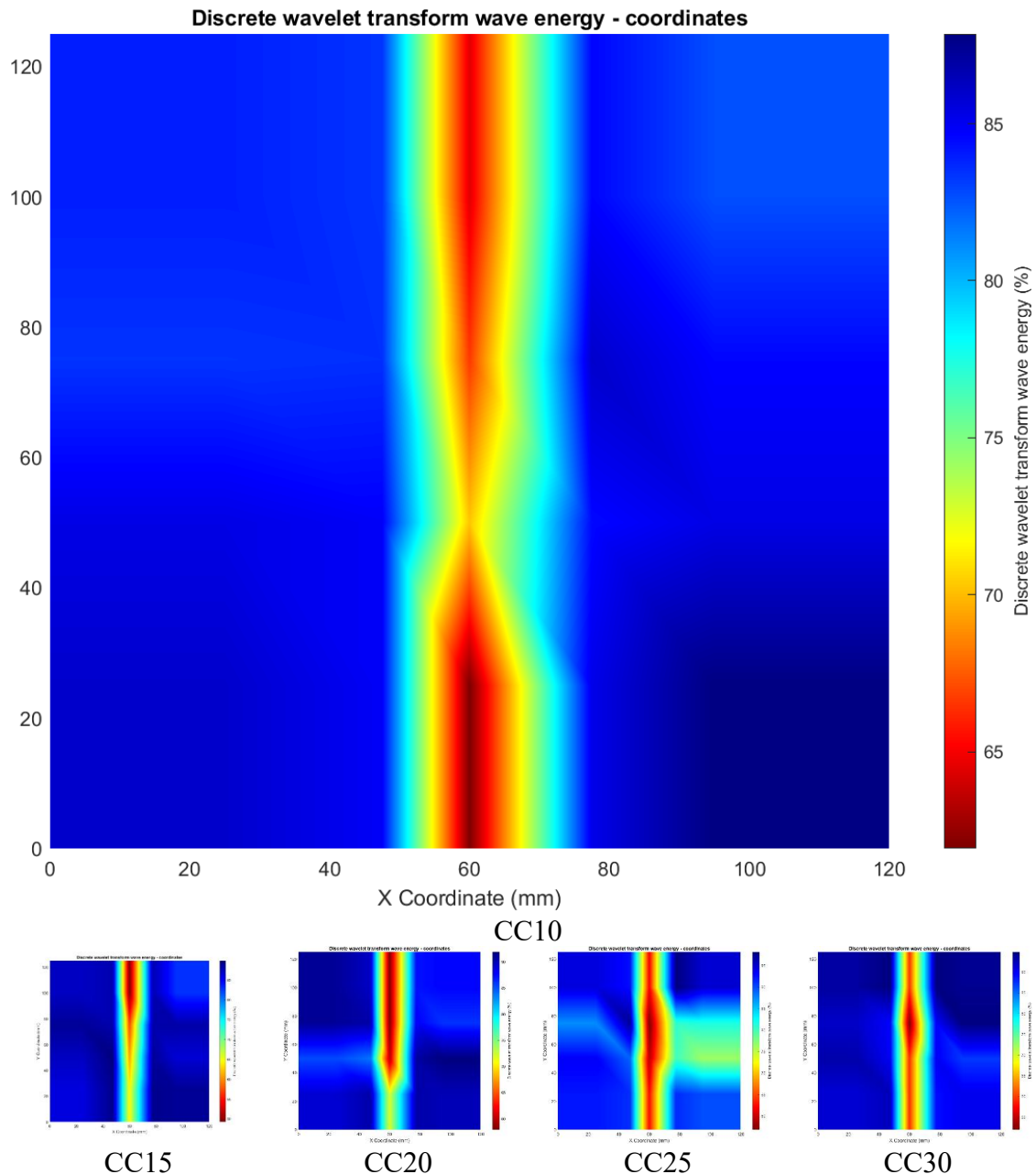
بر اساس تحلیل‌های پیشین، بازه فرکانسی ۰-۲۰ کیلوهرتز برای بخش آسیب‌دیده، بازه فرکانسی ۲۰-۸۰ کیلوهرتز برای بخش سالم و بازه بیشتر آن مربوط به نویزهای محیطی مشخص شدند.

در ادامه، نقشه کانتور میزان انرژی نسبی بازه فرکانسی سالم در کل نمونه تعیین می‌شود. با رسم نقشه کانتور کاهش میزان انرژی نسبی در برخی قسمت‌ها که نشانگر قسمت‌های آسیب‌دیده نمونه است، معلوم شد. این امر نشان‌دهنده وجود آسیب در این نواحی از نمونه است.

شکل ۱۵ نقشه کانتور میزان انرژی نسبی بازه فرکانسی سالم در پنج نمونه CC را نشان می‌دهد که با استفاده از تبدیل موجک گسسته تجزیه و تحلیل شده است.

با تحلیل دقیق‌تر نقشه‌های کانتور سرعت پالس اولتراسونیک و با توجه به داده‌های جدول ۳، مشخص شد که نمونه CC10 به دلیل استفاده از مقدار کم سیمان و عدم سخت‌شدن یکنواخت ملات سیمان از زمان ریختن مواد در قالب تا رسیدن به مقاومت اولیه، همگن نمی‌باشد. همچنین، هدررفت آب در این نمونه‌ها زیاد است که به ناهمگنی ساختار منجر شده است. به همین دلیل، تغییرات سرعت پالس اولتراسونیک در بخش سالم (DVH) بیشتر از اختلاف میانگین سرعت در بخش سالم و آسیب‌دیده (AVH-AVD) است. همین شرایط و رفتار مشابه نیز برای نمونه‌های CC15 و CC20 مشاهده می‌شود. در نمونه CC20، تغییرات سرعت در بخش سالم نمونه ناچیز است؛ اما به دلیل آسیب‌دیدگی لبه نمونه هنگام خروج از قالب، افت سرعت پالس در لبه پایین سمت راست به‌وضوح قابل مشاهده است. در مقابل، در نمونه‌های CC25 و CC30 به دلیل افزایش میزان سیمان مصرفی، هدررفت آب در زمان گیرش اولیه کاهش یافته و ساختار نمونه‌ها همگن‌تر شده است.

بنابراین استفاده تنها از سرعت پالس اولتراسونیک برای بررسی آسیب در نمونه‌های ملات سیمان به ویژه با میزان



شکل ۱۵- نقشه کانتور میزان انرژی نسبی فرکانس سالم پنج نمونه CC با حفره به قطر ۱ سانتی‌متر با تبدیل موجک گسسته همان‌طور که در شکل فوق مشاهده می‌شود، به دلیل بزرگ بودن حفره موجود به قطر ۱ سانتی‌متر، نقشه کانتور میزان انرژی نسبی فرکانس سالم نمونه با تبدیل موجک گسسته به وضوح آسیب‌های موجود در نمونه‌ها را مشخص می‌کند.

جدول ۴ اطلاعات کاملی از میانگین انرژی نسبی در قسمت سالم (AEHDWT) و آسیب‌دیده (AEDDWT) و تغییرات انرژی نسبی در قسمت سالم (DEHDWT) با استفاده از تبدیل موجک گسسته را در هر نمونه CC نشان می‌دهد.

جدول ۴- میانگین انرژی نسبی در قسمت سالم و آسیب‌دیده و تغییرات انرژی نسبی در قسمت سالم با حفره به قطر ۱ سانتی‌متر در نمونه‌های CC با استفاده از تبدیل موجک گسسته

اسم نمونه	AEHDWT (%)	AEDDWT (%)	AEHDWT-AEDDWT	DEHDWT (%)	وضعیت بررسی
	انرژی نسبی در بخش سالم	انرژی نسبی در بخش آسیب‌دیده	تغییرات انرژی در ابتدا و انتهای نمونه		
CC10	۸۴.۷۴۶	۶۵.۸۱۵	۱۸.۹۳۱	۵.۱۷	
CC15	۸۷.۸۳۲	۵۸.۰۱۲	۲۹.۸۲	۶.۸۷	
CC20	۸۸.۹۶۳	۶۱.۸۹	۲۷.۰۷۳	۷.۹۹	
CC25	۸۹.۴۷۵	۶۰.۰۲۷	۲۹.۴۴۸	۱۲.۸۳	
CC30	۹۱.۶۷۲	۵۷.۵۷۲	۳۴.۱۰۳	۷.۵۹	

می‌توان به راحتی آسیب‌ها را در نمونه‌ها شناسایی کرد. شایان ذکر است که انرژی نسبی به دست آمده از تبدیل موجک گسسته هر سیگنال، برخلاف سرعت پالس اولتراسونیک، به همگنی نمونه‌ها وابستگی کمتری داشته و بیشتر تحت تأثیر وجود آسیب در نمونه‌ها است.

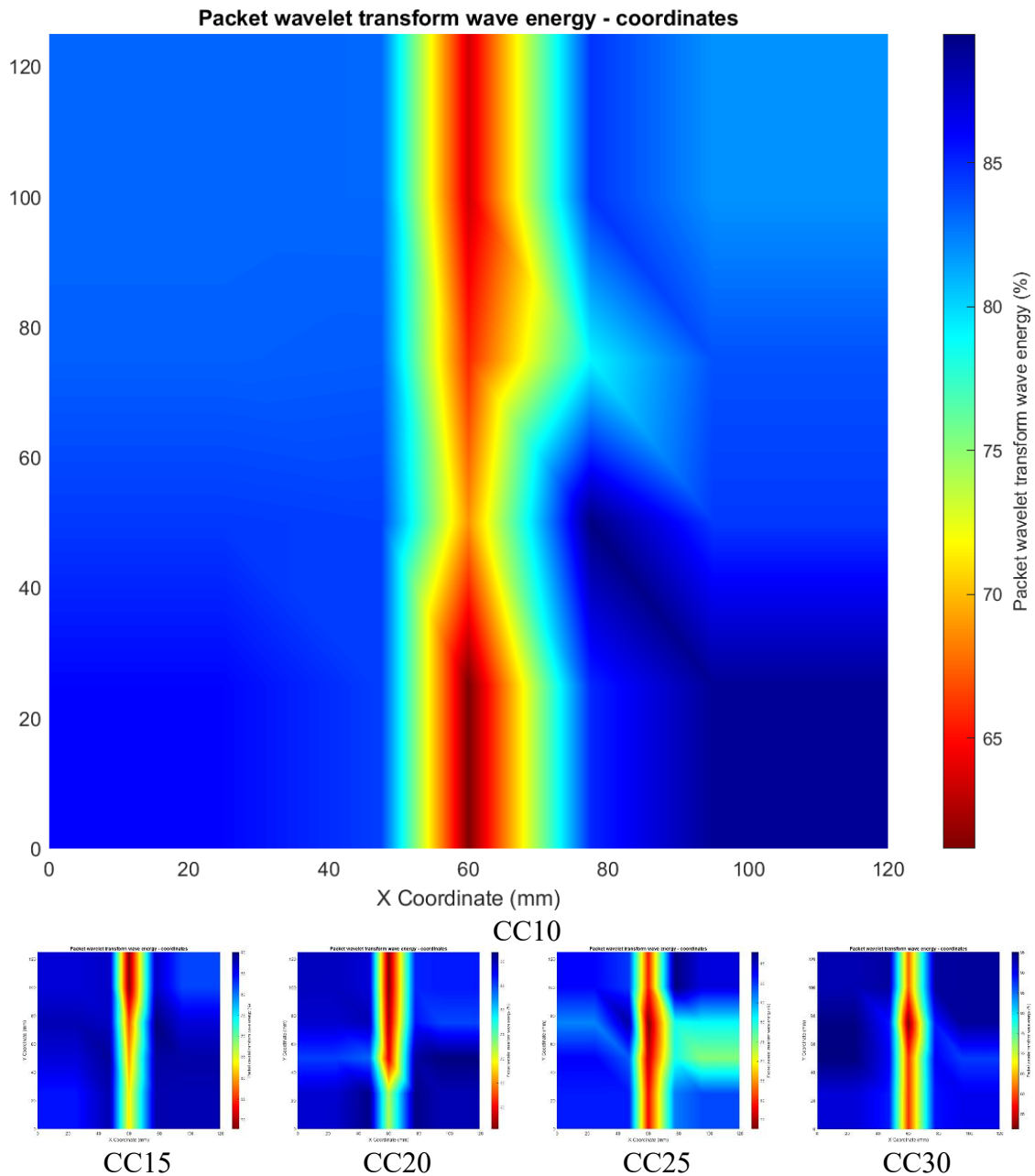
۴-۴- نقشه کانتور میزان انرژی نسبی در فرکانس

سالم با تحلیل انجام شده با تبدیل موجک بسته

در ادامه، میزان انرژی نسبی در بازه فرکانسی سالم برای نمونه‌ها با استفاده از تبدیل موجک بسته بررسی می‌شود. شکل ۱۶ نقشه کانتور پنج نمونه CC را نشان می‌دهد که بر اساس میزان انرژی نسبی در بازه فرکانسی سالم، با استفاده از تبدیل موجک بسته تهیه شده است.

بررسی جدول فوق، نشان می‌دهد که تغییرات انرژی نسبی در بخش سالم نمونه کمتر از اختلاف میانگین انرژی نسبی در قسمت سالم و آسیب‌دیده است.

در نمونه‌های ساخته‌شده، میانگین انرژی نسبی در بازه فرکانسی سالم با استفاده از تبدیل موجک گسسته برابر با ۸۸.۵۳۷ درصد است و انرژی نسبی تمامی نمونه‌ها در بازه‌ای با اختلاف کمتر از ۵ درصد از این میانگین قرار دارند. همچنین، در تمامی نمونه‌ها اختلاف انرژی نسبی سیگنال از انتها تا ابتدای نمونه کمتر از اختلاف انرژی نسبی بین نواحی سالم و آسیب‌دیده است. این نتایج نشان می‌دهد که اندازه‌گیری انرژی نسبی در بازه فرکانسی سالم با استفاده از تبدیل موجک گسسته ابزار کارآمدی برای شناسایی آسیب‌ها، حتی در ابعاد کوچک، محسوب می‌شود. با استفاده از انرژی نسبی به دست آمده از تبدیل موجک گسسته هر سیگنال،



شکل ۱۶- نقشه کانتور پنج نمونه CC با حفره به قطر ۱ سانتی‌متر بر اساس میزان انرژی نسبی فرکانس در بازه فرکانسی سالم نمونه با استفاده از تبدیل بسته موجک

بخش سالم (*AEHWPT*) و بخش آسیب‌دیده (*AEDWPT*) و همچنین تغییرات انرژی نسبی از ابتدا و انتهای نمونه (*DEHWPT*) در نمونه‌های CC با حفره‌ای به قطر ۱ سانتی‌متر با استفاده از تبدیل موجک بسته را ارائه می‌دهد.

چنانچه در شکل فوق مشاهده می‌شود، تحلیل انرژی نسبی سیگنال‌ها در فرکانس سالم به طور واضح آسیب‌های موجود (حفره‌ای با قطر ۱ سانتی‌متر) در نمونه‌های CC را آشکار کند.

جدول ۵ اطلاعات دقیقی از میانگین انرژی نسبی در

جدول ۵- میانگین انرژی نسبی در بخش سالم و آسیب‌دیده و تغییرات انرژی نسبی در ابتدا و انتهای نمونه CC با حفره به قطر ۱ سانتی‌متر با استفاده از تبدیل موجک بسته

وضعیت بررسی	DEHWPT (%)	AEHWPT-AEDWPT	AEDWPT (%)	AEHWPT (%)	اسم نمونه
تغییرات انرژی در ابتدا و انتهای نمونه			انرژی نسبی در بخش آسیب‌دیده	انرژی نسبی در بخش سالم	
	۷.۵۹	۱۹.۵۶۳	۶۴.۷۸۷	۸۴.۳۵	CC10
	۷.۹۷	۳۰.۶۴۸	۵۶.۶۲۷	۸۷.۲۷۵	CC15
	۷.۹۸	۲۷.۶۷۵	۶۰.۸۶۵	۸۸.۵۴	CC20
	۱۲.۸۱	۳۱.۹۷۸	۵۶.۳۸۷	۸۸.۳۶۵	CC25
	۷.۸۱	۳۳.۹۹۱	۵۷.۴۳۵	۹۱.۴۲۶	CC30

منظر مکانیک شکست نیز قابل تفسیر است. هنگام انتشار موج فراصوت در ماده‌ای همگن، انرژی به‌صورت پیوسته منتقل می‌شود. اما در حضور یک آسیب نظیر ترک یا حفره، بخشی از انرژی موج دچار بازتاب، پراکندگی و جذب موضعی می‌شود که موجب کاهش انرژی نسبی در ناحیه سالم و افزایش انرژی در بازه‌های فرکانسی پایین‌تر (مرتبط با آسیب) می‌گردد.

از دیدگاه مکانیک شکست، حضور چنین آسیب‌هایی منجر به تمرکز تنش در اطراف ترک شده و شرایطی را برای رشد تدریجی یا آنی ترک فراهم می‌کند. بنابراین، کاهش سرعت موج و تغییر در الگوی انرژی سیگنال، می‌تواند به‌عنوان شاخصی برای ایجاد یا گسترش ناحیه شکست تلقی شود. در نمونه‌هایی با درصد سیمان کمتر، که چقرمگی شکست نیز به‌طور معمول پایین‌تر است، تغییرات انرژی سیگنال در نواحی آسیب‌دیده محسوس‌تر بوده و این موضوع تأییدکننده حساسیت بیشتر این نمونه‌ها نسبت به آسیب‌ها است.

در واقع، تحلیل انرژی نسبی در بازه‌های فرکانسی مختلف با استفاده از تبدیل موجک می‌تواند به‌عنوان ابزاری مکمل برای تحلیل شکست در مصالح شبه‌سنگی عمل کند، زیرا تغییرات انرژی در این تحلیل‌ها، نمایی از تأثیر هندسه و ابعاد ترک بر مسیر و ماهیت انتشار موج است.

۵- بحث

نتایج این پژوهش نشان داد که ترکیب تبدیل موجک گسسته و تبدیل بسته موجک با آزمون اولتراسونیک، ابزاری مؤثر در شناسایی آسیب داخلی نمونه‌های ملات‌سیمانی است. یافته‌ها نشان داد که انرژی نسبی در باند سالم از ۲.۴۲ درصد در نمونه‌های سالم به ۱۱.۲۶

بررسی داده‌های این جدول نشان می‌دهد که تغییرات انرژی نسبی در ابتدا و انتهای نمونه‌ها کمتر از اختلاف میانگین انرژی نسبی در بخش سالم و آسیب‌دیده است. در نمونه‌های ساخته‌شده، میانگین انرژی نسبی در بازه فرکانسی سالم با استفاده از تبدیل موجک بسته برابر با ۸۷.۹۹۱ درصد است، که در تمامی نمونه‌ها این مقدار در محدوده‌ای با کمتر از ۵ درصد اختلاف از میانگین کل قرار دارد. همچنین، اختلاف انرژی نسبی سیگنال در ابتدا و انتهای نمونه‌ها کمتر از اختلاف انرژی نسبی در بخش‌های سالم و آسیب‌دیده است. این نتایج نشان می‌دهد که تحلیل انرژی نسبی سیگنال‌ها در بازه فرکانسی سالم با استفاده از تبدیل موجک بسته می‌تواند ابزاری کارآمد و مؤثر برای شناسایی آسیب حتی در ابعاد کوچک نیز باشد. در مجموع، هر دو روش موجک‌محور نسبت به روش کلاسیک سرعت پالس، در تشخیص موقعیت دقیق آسیب عملکرد قابل قبولی از خود نشان داده‌اند.

تفاوت کلیدی بین تبدیل موجک گسسته و تبدیل بسته موجک در نحوه تجزیه باندهای فرکانسی است. در تبدیل موجک گسسته تنها ضرایب جزئی سطح بالا^{۳۳} در سطوح بعدی تحلیل می‌شوند، در حالی که در تبدیل بسته موجک تمام باندها (چه جزئی و چه تفاضلی) به‌صورت هم‌سطح تجزیه می‌شوند. این ویژگی باعث می‌شود تبدیل بسته موجک بتواند بازه‌های فرکانسی را با جزئیات بیشتر پوشش دهد و در نتیجه در تشخیص نواحی آسیب‌دیده، به‌ویژه در مواد غیرهمگن، عملکرد دقیق‌تری داشته باشد.

تحلیل سیگنال‌های اولتراسونیک در این پژوهش از

³³ approximation

۶- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در این پژوهش، با استفاده از آزمون غیرمخرب اولتراسونیک و تحلیل انرژی سیگنال به کمک تبدیل موجک گسسته و تبدیل بسته موجک، امکان شناسایی عیب در نمونه‌های ملات سیمانی با درصدهای مختلف سیمان بررسی شد. یافته‌های اصلی به شرح زیر هستند:

انرژی نسبی در باند فرکانسی سالم برای نمونه‌های سالم به‌طور میانگین حدود ۹۵.۵ درصد و برای نمونه‌های دارای حفره حدود ۸۰.۵۵ درصد بود. در مقابل، انرژی در باند آسیب از ۲.۴۲ درصد در نمونه سالم به ۱۱.۲۶ درصد در نمونه آسیب‌دیده افزایش یافت.

در نمونه‌های با درصد سیمان پایین‌تر ($CC10$) و ($CC15$)، روش کلاسیک سرعت پالس در تشخیص محل حفره عملکرد ضعیفی داشت، در حالی که هر دو روش تبدیل موجک گسسته و تبدیل بسته موجک توانستند محل آسیب را با وضوح قابل قبولی مشخص کنند.

تبدیل بسته موجک نسبت به تبدیل موجک گسسته تفکیک‌پذیری بالاتری از نظر انرژی فرکانسی ارائه داد و در مرزبندی دقیق محل آسیب موفق‌تر عمل کرد.

افزایش درصد سیمان از $CC10$ تا $CC30$ باعث افزایش سرعت پالس از ۴۰۰۷ متر بر ثانیه تا ۹۷۶۸ متر بر ثانیه و باعث بهبود همگنی شد، که خود عامل افزایش دقت روش‌های غیرمخرب در تشخیص آسیب بود.

نوآوری این پژوهش در ترکیب آزمون غیرمخرب اولتراسونیک با تحلیل انرژی سیگنال در باندهای فرکانسی سالم و آسیب‌دیده به کمک تبدیل موجک گسسته و بسته است، که امکان شناسایی دقیق محل آسیب را حتی در نمونه‌های کم‌مقاومت فراهم می‌کند. همچنین بررسی تأثیر درصد سیمان بر رفتار امواج و توان تشخیص عیب، به‌صورت کمی و مقایسه‌ای، از دیگر ویژگی‌های متمایز این تحقیق محسوب می‌شود.

با توجه به نتایج این پژوهش، هرچند روش ترکیبی آزمون اولتراسونیک و تحلیل موجک توانست آسیب‌ها را با دقت قابل‌قبولی در نمونه‌های آزمایشگاهی شناسایی کند، اما تعمیم آن به شرایط واقعی نیازمند تحقیقات بیشتر است. برای توسعه این حوزه، پیشنهاد می‌شود کاربرد این روش در نمونه‌های واقعی بتنی با ترک‌های طبیعی، شکل نامنظم و در مقیاس‌های بزرگ‌تر بررسی شود. همچنین، بهره‌گیری از

درصد در نمونه‌های آسیب‌دیده افزایش یافت. این تغییر انرژی با نرخ افزایش قابل‌توجه ۴٫۶۵ برابر همراه بود، که نشانگر حساسیت بالای تحلیل موجک در تشخیص آسیب است.

در این تحقیق بر روی نمونه $CC10$ با حفره مصنوعی به قطر ۱ سانتی‌متر، سرعت پالس از ۴۰۰۷٫۶۲ متر بر ثانیه به ۳۵۵۹٫۲۵ متر بر ثانیه افت کرد، یعنی کاهش ۱۱.۲ درصد که دقیقاً در بازه تغییرات گزارش شده است. این همسانی عددی نشان می‌دهد که رفتار نمونه با شرایط واقعی قابل مقایسه است و اختلاف در بازه طبیعی قرار دارد.

در مطالعه‌ای بر بتن با استفاده از تبدیل گسسته و وی [۱۲] سرعت فاز موج را استخراج کردند و مشاهده نمودند که طیف انرژی فرکانسی، به‌خصوص انرژی در نواحی ۳۰-۷۰ کیلوهرتز، حساسیت بیشتری نسبت به نقص‌ها نشان می‌دهد. نتایج این تحقیق نیز نشان می‌دهد انرژی نسبی در باند ۲۰-۸۰ کیلوهرتز در نمونه‌های آسیب‌دیده ۱۵ درصد کاهش (از ۹۵.۵ درصد به ۸۰.۵۵ درصد) و انرژی در باند آسیب ۱۰.۸ درصد افزایش (از ۲.۴۲ درصد به ۱۱.۲۶ درصد) دارد؛ کاهش دامنه انرژی با تبدیل موجک، همان حساسیت ویژه تبدیل S را تأیید می‌کند.

هو و همکاران [۱۶] با ترکیب تبدیل بسته موجک و شبکه عصبی $GA-BP$ ، انرژی نسبی سیگنال اولتراسونیک را برای سوراخ‌های ۵، ۷ و ۹ میلی‌متری در بتن $C30$ استخراج کردند. آن‌ها مواردی مانند نسبت انرژی بالای ۹۰ درصد در باند اصلی و دقت طبقه‌بندی حدود ۹۱ درصد را گزارش کردند. در این تحقیق نیز، انرژی در باند سالم نمونه‌های بدون نقص ۹۵.۵ درصد است و با تبدیل موجک گسسته و تبدیل بسته موجک نیز توانسته با وضوح قابل قبول، محل آسیب را شناسایی کند؛ این نشان‌دهنده صحت یافته‌های هو و همکاران و قابلیت خوب روش این تحقیق در بازتولید این نتایج در نمونه‌های ملات سیمانی است.

در این مطالعه مشاهده شد که تبدیل بسته موجک نسبت به تبدیل موجک گسسته دقت تفکیک‌پذیری بیشتری دارد. حتی در نمونه‌های ناهمگون مانند $CC15$ نیز مرز آسیب واضح‌تر و ساده‌تر مشخص شده است. این تطابق عددی با گزارش ژائو و همکاران، تأیید برتری تبدیل بسته موجک است.

ارزیابی عملکرد روش در شرایط محیطی واقعی شامل تغییرات دما، رطوبت و وجود آرماتور، و همچنین توسعه آن برای کاربرد در سایر مصالح ساختمانی مانند سنگ طبیعی، بتن سبک و کامپوزیت‌های زمینه سیمانی از جمله مسیرهای تحقیقاتی ارزشمند برای آینده هستند.

الگوریتم‌های یادگیری ماشین و شبکه‌های عصبی می‌تواند فرایند طبقه‌بندی و تشخیص خودکار سیگنال‌های سالم و آسیب‌دیده را بهبود بخشد. ترکیب تحلیل موجک با داده‌های چندحسگری نظیر امواج حرارتی یا الکترومغناطیسی نیز می‌تواند به افزایش دقت شناسایی کمک کند. علاوه بر این،

۷- منابع

- [1] J. Chakraborty and M. Stolinski, "Signal-level fusion approach for embedded ultrasonic sensors in damage detection of real RC structures," *Mathematics*, vol. 10, no. 5, p. 724, 2022.
- [2] F. A. J. Mohamad *et al.*, "NDT-Defect Detection on Concrete using Ultrasonic: A Review," *J. Tomogr. Syst. Sensors Appl.*, 2021.
- [3] G. Karaiskos, A. Deraemaeker, D. G. Aggelis, and D. Van Hemelrijck, "Monitoring of concrete structures using the ultrasonic pulse velocity method," *Smart Mater. Struct.*, vol. 24, no. 11, p. 113001, 2015, doi: 10.1088/0964-1726/24/11/113001.
- [4] L. Ge *et al.*, "High-resolution ultrasonic imaging technology for the damage of concrete structures based on total focusing method," *Comput. Electr. Eng.*, vol. 105, p. 108526, 2023.
- [5] R. Jones, "The ultrasonic testing of concrete," *Ultrasonics*, vol. 1, no. 2, pp. 78–82, 1963, doi: 10.1016/0041-624X(63)90058-1.
- [6] I. Ivanchev and V. Slavchev, "About the possible limitations in the usage of the non-destructive ultrasonic pulse velocity method for assessment of cracks in reinforced concrete structures, subjected to direct environmental exposure," *Buildings*, vol. 9, no. 9, p. 202, 2019, doi: 10.3390/buildings9090202.
- [7] A. Lorenzi, J. Campagnolo, and L. C. P. Silva Filho, "Application of artificial neural network for interpreting ultrasonic readings of concrete," *Int. J. Mater. Prod. Technol.*, vol. 26, no. 1–2, pp. 57–70, 2006, doi: 10.1504/IJMPT.2006.008980.
- [8] A. Lorenzi, L. C. P. da Silva Filho, L. Somensi Lorenzi, R. Shimomukay, and C. J. Argenta, "Monitoring Concrete Structures through UPV Results and Image Analysis," *e-Journal Nondestruct. Testing, Ger.*, vol. 16, p. 12, 2011.
- [9] S. Hannachi and M. N. Guetteche, "Application of the Combined Method for Evaluating the Compressive Strength of Concrete on Site," *Open J. Civ. Eng.*, vol. 02, no. 01, pp. 16–21, 2012, doi: 10.4236/ojce.2012.21003.
- [10] S. Mindess, J. F. Young, and D. Darwin, "Application of wavelet transform in ultrasonic testing for concrete crack detection," *Englewood Cliffs, NJ*, vol. 481, p. 939, 1981.
- [11] S. A. Stel'makh *et al.*, "Composition, technological, and microstructural aspects of concrete modified with finely ground mussel shell powder," *Materials (Basel)*, vol. 16, no. 1, p. 82, 2022.
- [12] J. Xu and H. Wei, "Ultrasonic testing analysis of concrete structure based on S transform," *Shock Vib.*, vol. 2019, pp. 1–9, 2019.
- [13] S. Hassani, M. Mousavi, and A. H. Gandomi, "Structural health monitoring in composite structures: A comprehensive review," *Sensors*, vol. 22, no. 1, p. 153, 2021.
- [14] B. B. Tefera and A. G. Tarekegn, "Non-Destructive Testing Techniques for Condition Assessment of Concrete Structures: A Review," 2025.
- [15] X. Xu *et al.*, "Advanced Nondestructive Monitoring and Detection Apparatus against Marine Concrete Durability: A Review," *J. Struct. Des. Constr. Pract.*, vol. 30, no. 2, p. 4025011, 2025.
- [16] T. Hu, J. Zhao, R. Zheng, P. Wang, X. Li, and Q. Zhang, "Ultrasonic based concrete defects identification via wavelet packet transform and GA-BP neural network," *PeerJ Comput. Sci.*, vol. 7, p. e635, 2021.
- [17] S. Grabke, F. Clauß, K.-U. Bletzinger, M. A. Ahrens, P. Mark, and R. Wüchner, "Damage detection at a reinforced concrete specimen with coda wave interferometry," *Materials (Basel)*, vol. 14, no. 17, p. 5013, 2021.
- [18] J. A. Mukhti, K. P. V Robles, K.-H. Lee, and S.-H. Kee, "Evaluation of early concrete damage

- caused by chloride-induced steel corrosion using a deep learning approach based on RNN for ultrasonic pulse waves,” *Materials (Basel)*, vol. 16, no. 9, p. 3502, 2023.
- [19] M. N. A. B. G. Taj, N. Alruwais, H. M. Alshahrani, J. Vijayalakshmi, N. Shanmugapriya, and S. Jayaprakash, “Precision crack analysis in concrete structures using CNN, SVM, and KNN: a machine learning approach,” *Matéria (Rio Janeiro)*, vol. 29, p. e20240551, 2024.
- [20] C. ASTM, “192/C 192M Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory,” *Annu. B. ASTM Stand.*, vol. 4, 2007.
- [21] N. S. M. Ravi Kumar, T. Barkavi, and C. Natarajan, “Structural health monitoring: detection of concrete flaws using ultrasonic pulse velocity,” *J. Build. Pathol. Rehabil.*, vol. 3, pp. 1–9, 2018.
- [22] D. W. Dunker and J. Farny, “Your Pipe Lining Has a New Cement—ASTM C150 Compared to ASTM C595,” in *Pipelines 2024*, pp. 312–320.
- [23] S. A. Proceq, “Operating Instructions Pundit Lab,” *Pundit Lab+ Ultrason. Instrum.*, vol. 32, 2017.
- [24] S. Hannachi and M. N. Guetteche, “Review of the ultrasonic pulse velocity Evaluating concrete compressive strength on site,” in *Proceedings of Scientific Cooperation International Workshops on Engineering Branches, Istanbul, Turkey*, 2014, no. August, pp. 103–112.
- [25] A. Ezzodin, G. Ghodrati Amiri, H. Naderpour, and M. Raissi Dehkordi, “A Novel Damage Detection Method of Reinforced Concrete Frames Using Signal Processing and Extracted Near-Fault Fling-Step Pulses,” *Shock Vib.*, vol. 2022, 2022.
- [26] S. Huang, H. Sun, S. Wang, K. Qu, W. Zhao, and L. Peng, “SSWT and VMD linked mode identification and time-of-flight extraction of denoised SH guided waves,” *IEEE Sens. J.*, vol. 21, no. 13, pp. 14709–14717, 2021.
- [27] H. Jahangir, M. Khatibinia, and M. Mokhtari Masinaei, “Damage detection in prestressed concrete slabs using wavelet analysis of vibration responses in the time domain,” *J. Rehabil. Civ. Eng.*, vol. 10, no. 3, pp. 37–63, 2022.
- [28] J. Zhao, T. Hu, R. Zheng, P. Ba, C. Mei, and Q. Zhang, “Defect recognition in concrete ultrasonic detection based on wavelet packet transform and stochastic configuration networks,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 9284–9295, 2021.
- [29] N. Burud and J. M. C. Kishen, “Damage detection using wavelet entropy of acoustic emission waveforms in concrete under flexure,” *Struct. Heal. Monit.*, vol. 20, no. 5, pp. 2461–2475, 2021.
- [30] X. Xu *et al.*, “A systematic review of ultrasonic techniques for defects detection in construction and building materials,” *Measurement*, p. 114181, 2024.
- [31] N. N. Kencanawati, B. Anshari, A. G. Paedullah, and M. Shigeishi, “The study of ultrasonic pulse velocity on plain and reinforced damaged concrete,” in *MATEC Web of Conferences*, 2018, vol. 195, p. 2026.



Damage detection in cement mortar samples using wavelet transform analysis of non-destructive ultrasonic test results

Abolfazl Faghihi¹; Hamed Molladavoodi^{2*}

1- M.Sc. Student of Rock Mechanics, Faculty of Mining Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.

2- Associate Professor of Rock Mechanics, Faculty of Mining Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.

Received: 08 January 2025 Accepted: 19 March 2025
(*Corresponding author: davoodi@aut.ac.ir)

Keywords

Ultrasonic Non-Destructive Testing, Cemented Quasi-Rock Materials, Crack, Discrete Wavelet Transform, Wavelet Packet Transform, Relative Frequency Energy

Final English Extended Abstract

In many previous studies on the nondestructive evaluation of cementitious materials, the primary focus has been on measuring ultrasonic pulse velocity, while signal analysis has largely remained qualitative or generalized. However, quantitative analysis of ultrasonic signal energy within specific frequency bands using wavelet-based techniques represents a research gap. This study explores the application of ultrasonic nondestructive testing for detecting defects and discontinuities in cement mortar samples with varying mix designs. Mortar samples with different cement contents (CC) were analyzed to investigate the relationship between material composition, wave velocity, and

transit time. Ultrasonic signals were processed using Discrete Wavelet Transform (DWT) and Wavelet Packet Transform (WPT) to assess energy distribution across targeted frequency bands. Results revealed that the relative energy in the healthy frequency range was 95.5% in intact samples and 80.55% in damaged samples, while the energy in the damaged frequency band increased from 2.42% to approximately 11.26%. Additionally, increasing the cement content by about 20% improved the homogeneity of the samples, as the ultrasonic pulse velocity rose from 4007.62 m/s in the CC10 sample to 9768.5 m/s in the CC20 sample. The novelty of this research lies in integrating ultrasonic testing with wavelet-based energy analysis in specific frequency bands and quantitatively evaluating the impact of cement percentage on damage detection accuracy. This approach enables precise identification of damage even in low-strength samples. The study underscores the potential of signal processing techniques for effective defect detection and material homogeneity assessment in cement mortar samples with variable cement content.

Summary

This study examines the use of ultrasonic wave propagation and wavelet transform techniques to assess cement mortar samples with different cement contents (CC10 to CC30). The aim was to analyze how damage affects ultrasonic signals and to test the effectiveness of Discrete Wavelet Transform (DWT) and Wavelet Packet Transform (WPT) for detecting damage.

The results showed that healthy regions had higher energy and frequencies (20-100 kHz) compared to damaged regions (0-20 kHz). Lower cement content samples (CC10, CC15) had higher energy in damaged areas, while higher cement content samples (CC20-30) showed reduced energy. This indicates that both damage and material composition influence the ultrasonic signals.

Overall, the study confirms that DWT and WPT are effective methods for detecting damage in cement-based materials.

Introduction

Concrete is a widely used construction material due to its high strength and cost efficiency. Monitoring its condition,



especially in aging structures, is essential to ensure safety and reduce maintenance costs. This study focuses on cement mortar samples—mixtures of sand, cement, and water—offering rock-like mechanical behavior after curing.

Non-destructive testing (NDT), particularly ultrasonic testing, provides an effective method for evaluating material properties without causing damage. It enables the detection of internal defects, assessment of homogeneity, and monitoring of structural health over time. The cement content plays a critical role in determining strength, durability, and crack resistance; however, excess cement may reduce workability and increase costs.

Ultrasonic signals, when processed using advanced techniques such as Discrete Wavelet Transform (DWT) and Wavelet Packet Transform (WPT), reveal detailed time-frequency characteristics. These methods allow for more accurate defect detection and material evaluation.

This research investigates the effect of cement content on ultrasonic wave propagation in mortar samples and applies wavelet-based signal processing to enhance defect identification and material characterization.

Methodology and Approaches

This study used ultrasonic non-destructive testing (NDT) to assess damage in cementitious mortar samples with varying cement contents. Five samples with different water-to-cement ratios were tested using a Pundit Lab 2017 device and 54 kHz transducers. Each sample was scanned at 20 points, with ten repetitions per point to ensure accuracy. Signal data was processed with Punditlink and GetData Graph Digitizer.

To analyze the ultrasonic signals, Discrete Wavelet Transform (DWT) with the Daubechies 5 (db5) mother wavelet was applied. Additionally, Wavelet Packet Transform (WPT) was used to enhance frequency resolution. These wavelet methods provided better detection of minor defects compared to traditional Fourier techniques, offering improved time-frequency localization and noise reduction.

Results and Conclusions

In this section, the results from analyzing ultrasonic signals of healthy and damaged areas in cement mortar samples (CC10, CC15, CC20, CC25, CC30) are presented. These signals were analyzed using Discrete Wavelet Transform (DWT) and Wavelet Packet Transform (WPT) to identify frequency characteristics and energy distribution in healthy and damaged regions under different mix proportions. The analysis aims to understand the impact of damage level and cement content on signal properties.

The DWT and WPT were both performed using the Daubechies wavelet of level 5. The ultrasonic signals were processed in MATLAB, where they were decomposed into partial and main signal components based on the Daubechies wavelet. This process helped isolate the different levels of the signal.

The frequency range for healthy concrete samples was determined to be 20-100 kHz, with damaged areas showing a frequency range of 0-20 kHz. Energy analysis revealed that healthy regions contained significantly more energy than damaged ones, as reflected by the relative energy percentages from both DWT and WPT methods. These results indicate that wavelet transforms are effective tools for distinguishing between healthy and damaged areas.

Additionally, the speed of ultrasonic pulse propagation was mapped for different sample mixes, showing variations in speed between healthy and damaged regions. Contour maps and relative energy analysis further highlighted the presence of damage, showing how cement content influences the homogeneity of the material. In samples with lower cement content (CC10 and CC15), there was a noticeable increase in energy in the damaged region compared to the healthy region. Conversely, with higher cement content (CC20, CC25, CC30), the energy in the damaged regions decreased.

This study demonstrates that wavelet-based methods, including both DWT and WPT, provide valuable insights into the condition of cement-based materials. They effectively differentiate healthy from damaged areas and offer a promising approach for monitoring and evaluating the health of concrete structures..
