

Investigation of the Effect of Adding Antimony Oxide Nanoparticles on the Acoustic and Mechanical Properties of Concrete

Leila shahryari^{1*}, Alireza Javanmard²

1- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Shi.C., Islamic Azad University, Shiraz, Iran

2- M.Sc. in Civil Engineering, Structural Engineering, Department of Civil Engineering, Shi.C., Islamic Azad University, Shiraz, Iran

ABSTRACT

Noise pollution is one of the most important environmental and health issues of the present era, which is expanding due to urban population growth, industrial development, and the expansion of transportation. One of the main strategies to address noise pollution is the use of sound insulation systems that can prevent sound transmission and reduce its negative effects on both indoor and outdoor environments. In this regard, concrete, as a well-known construction material with high mechanical properties, plays a special role in reducing noise pollution. Ordinary concrete naturally has properties that block the passage of some sound waves. However, the use of sound-insulating concrete can further improve noise reduction performance. Such concrete, with specific additives, has an increased ability to absorb and dissipate sound waves. In this study, the effect of adding nano antimony oxide to concrete and its influence on acoustic and mechanical properties were investigated. The aim of this research was to enhance the acoustic performance of concrete to reduce sound transmission and to increase its mechanical strength through the use of nano antimony. For this purpose, nano antimony dioxide was used at various ratios of 0.1%, 0.3%, 0.5%, 0.7%, and 0.9% by weight of cement in the concrete mixtures, which were subjected to slump, compressive strength, tensile strength, flexural strength, and sound transmission loss tests using an impedance tube. The results showed that the use of 0.9% nano antimony oxide can improve the acoustic performance of concrete, including reducing sound transmission. In addition, the use of 0.3% nano antimony oxide increased the 90-day compressive strength of concrete by 22%. However, the use of this material had no significant effect on the flexural or tensile strength of the concrete.

ARTICLE INFO

Receive Date: 30 April 2025

Revise Date: 06 September 2025

Accept Date: 27 September 2025

Keywords:

Nano-Antimony
Sound Transmission Loss
Acoustic Performance
Impedance Tube
Nano materials

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2025.519472.3708>

*Corresponding author: Leila Shahryari
Email address: Leila.shahryari@iau.ac.ir

بررسی اثر افزودن نانو اکسید آنتیموان بر خواص آکوستیکی و مقاومتی بتن

لیلا شهریاری^{۱*}، علیرضا جوانمرد^۲

۱- استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران

۲- کارشناس ارشد مهندسی عمران گرایش سازه، گروه مهندسی عمران، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران

چکیده

آلودگی صوتی یکی از مهم‌ترین مشکلات زیست‌محیطی و بهداشتی عصر حاضر است که به دلیل افزایش جمعیت شهری، رشد صنعتی و توسعه حمل و نقل، در حال گسترش است. یکی از راهکارهای اصلی در مقابله با آلودگی صوتی، استفاده از سیستم‌های عایق صوتی است که قادر به جلوگیری از انتقال صدا و کاهش اثرات منفی آن بر محیط‌های داخلی و خارجی باشند. در این زمینه، بتن به عنوان یک ماده ساختمانی شناخته شده با خواص مکانیکی بالا، نقش ویژه‌ای در کاهش آلودگی صوتی ایفا می‌کند. بتن‌های معمولی به‌طور طبیعی دارای ویژگی‌هایی هستند که مانع از عبور برخی از امواج صوتی می‌شوند. با این حال، استفاده از بتن عایق صوتی می‌تواند کارایی بیشتری در کاهش صدا داشته باشد. این نوع بتن‌ها با افزودنی‌های خاص توانایی جذب و دفع امواج صوتی را افزایش می‌دهند. در این تحقیق، اثر افزودن نانو اکسید آنتیموان در بتن و تأثیر آن بر خواص آکوستیکی و مقاومتی بررسی شده است. هدف از این تحقیق، بهبود عملکرد صوتی بتن برای کاهش انتقال صدا و افزایش مقاومت مکانیکی آن از طریق استفاده از نانو آنتیموان بوده است. برای این منظور، از نانو دی‌اکسید آنتیموان در نسبت‌های مختلف ۰/۱، ۰/۳، ۰/۵، ۰/۷ و ۰/۹ وزنی سیمان در بتن استفاده شد و مورد آزمایش‌های اسلامپ، مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مقاومت خمشی و بررسی انتقال صوت با لوله امپدانس قرار گرفت. نتایج نشان داد که استفاده از ۰/۹٪ نانو اکسید آنتیموان می‌تواند موجب بهبود در عملکرد آکوستیکی، از جمله کاهش انتقال صدا، گردد. همچنین استفاده از ۰/۳٪ نانو اکسید آنتیموان توانست موجب افزایش ۲۲٪ مقاومت فشاری بتن در سن ۹۰ روز گردد. اما استفاده از این ماده تأثیر قابل توجهی بر روی مقاومت خمشی یا کششی بتن نداشت.

کلمات کلیدی: نانو آنتیموان، آفت انتقال صوت، آکوستیک صوت، لوله امپدانس، نانو مواد.

سابقه مقاله:		شناسه دیجیتال:			
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	doi:
۱۴۰۴/۰۲/۱۰	۱۴۰۴/۰۶/۱۵	۱۴۰۴/۰۷/۰۵	۱۴۰۴/۰۷/۰۵	۱۴۰۵/۰۲/۳۱	https://doi.org/10.22065/jsce.2025.519472.3708
*نویسنده مسئول:		لیلا شهریاری			
پست الکترونیکی:		Leila.shahryari@iau.ac.ir			

۱- مقدمه

آلودگی صوتی به صداها و امواج ناخواسته‌ای گفته می‌شود که برای انسان‌ها، آثار منفی به همراه دارند و می‌توانند موجب کاهش شنوایی، خستگی، کاهش تمرکز و مشکلات روحی و عصبی شوند. هدف اصلی عایق‌کاری صوتی در ساختمان‌ها، کاهش ورود و انتشار صداها، مزاحم و ایجاد محیطی آرام و مطلوب برای سلامت و آسایش ساکنان است. در محیط‌های باز، امواج صوتی می‌توانند بدون هیچ مانعی در فواصل طولانی حرکت کرده و تدریجاً تضعیف شوند. در حالیکه در محیط‌های بسته رفتار صدا از نظر انعکاس، جذب و عبور، وابستگی بیشتری به ویژگی‌های فیزیکی و جنس سطوح دارد. هنگامی که صوت به یک سطح برخورد می‌کند، بخشی از انرژی صوتی جذب سطح شده، قسمت دیگر بازتاب یافته و بخشی نیز از آن عبور می‌کند. اما میزان بازتاب به نوع و ساختار ماده بستگی دارد. مدیریت صحیح این رفتارها در پروژه‌های ساختمانی، اعم از مسکونی، فضاهای صنعتی، استودیوهای موسیقی یا اماکن ورزشی اهمیت زیادی دارد [۱].

عایق‌ها با جلوگیری از نفوذ صدا، کنترل دما و رطوبت و ممانعت از انتقال ارتعاشات، نقشی کلیدی در حفاظت سازه در برابر عوامل محیطی دارند و اهمیت آن‌ها در انطباق ساختمان‌ها با استانداردهای مدرن و الزامات زیست محیطی زیاد است. یکی از روش‌های مؤثر برای بهبود عملکرد صوتی سازه‌ها، افزودن مواد خاص به مصالح پایه در حین ساخت یا بهینه‌سازی خواص آکوستیکی آن‌هاست. رویکردی که جایگزین شیوه‌های سنتی مانند به‌کارگیری گچ، سنگ، آجر و درزبندی شده و امروزه با استفاده از پنجره‌های دوجداره و پوشش‌های تخصصی سقف توسعه یافته است [۲]. در این میان، بتن به دلیل مقاومت مطلوب در برابر آتش و فرسایش، سهولت اجرا، صرفه اقتصادی، توانایی ذخیره حرارت، خواص مکانیکی مناسب و قابلیت کنترل جذب و انتقال صدا، یکی از مصالح پرکاربرد ساختمانی محسوب می‌شود و در ایجاد شرایط آکوستیکی مناسب نقشی مؤثر دارد. استفاده از مواد عایق صوتی در بتن برای کف، دیوار و سقف می‌تواند هم موجب کاهش انرژی صوتی و هم جذب آن شود، به گونه‌ای که نیاز به نصب عایق‌های مجزا در سازه را از بین می‌برد [۳]. این ویژگی باعث شده بتن عایق صوتی و حرارتی به‌طور ویژه در سازه‌های واقع در شرایط آب‌وهوایی نامساعد یا محیط‌های پر سر و صدا کاربرد داشته باشد و حتی با اجرای لایه‌ای نازک، توان جذب و کنترل صداها، محیطی فراهم شود [۴]. هرچند برای کاهش بیشتر انتقال صوت، لازم است سطوح بتنی با مصالح خاص یا اثاثیه پوشانده شوند. بتن متخلخل به دلیل حفره‌های درون خود، قدرت جذب صوت بالایی دارد ولی عایق صوتی ضعیفی محسوب می‌شود. زیرا منافذ آن انتقال امواج صوتی را تسهیل می‌کنند و این امر می‌تواند موجب نوع دیگری از آلودگی صوتی شود. پوشاندن سطوح بتن متخلخل با لایه‌هایی چون پلاستر یا رنگ، میزان جذب صوت را کاهش داده اما خاصیت عایق بودن آن را تقویت می‌کند. به طور کلی، بتن پررزنه برای جذب صدا مؤثر است ولی به دلیل ساختارش مانع انتقال کامل صوت نمی‌شود. به‌خصوص در برابر فرکانس‌های بالا، و همچنین به دلیل مقاومت و دوام پایین، استفاده گسترده از آن در سازه‌های نیازمند استحکام بالا محدودیت دارد. در مقابل، استفاده از بتن به عنوان عایق صوتی با چگالی و ضخامت مناسب، چه به صورت پوشش معمولی و چه در قالب بتن اکسپوز، می‌تواند انتقال صدا را به طور محسوسی کاهش دهد و در این میان بتن جاذب صوت با ترکیبات ویژه به عنوان نوآوری مهم صنعت ساخت‌وساز در سال‌های اخیر با قابلیت‌های برتر در جذب و مهار صوت توسعه یافته است [۵، ۶].

طی سالیان اخیر تحقیقات مؤثری در این زمینه انجام شده است. کاپیکاپا و همکاران (۲۰۲۴) با ساخت بتن نفوذپذیر حاوی انواع سنگدانه، ۲۹ طرح اختلاط را آزمودند و بهترین عملکرد صوتی را برای نمونه‌های پوک ۳ تا ۷ میلی‌متر با ضریب کاهش نویز ۰/۷ و جذب ۰/۵۵ گزارش کردند. ترکیب سنگدانه ۴ تا ۸ میلی‌متر با نسبت آب به سیمان ۰/۲۲ و افزودنی‌های فوق‌روان‌کننده و دوده سیلیس نیز توازن مطلوبی میان خواص مکانیکی و آکوستیکی داشت [۷]. ژانگ و همکاران (۲۰۲۲) نشان دادند افزایش تخلخل و ضخامت در ۳۶ ترکیب بتن متخلخل موجب بهبود جذب صوت می‌شود [۸]. سن‌لین و همکاران (۲۰۲۱) دریافتند کاهش اندازه درشت‌دانه در کامپوزیت سیمانی متخلخل بیشترین جذب صوت را ایجاد می‌کند [۹]. استولز و همکاران (۲۰۱۸) گزارش کردند افزودن پودر آلومینیوم و فیبر سلولز مقاومت فشاری و جذب صوت را افزایش می‌دهد و جایگزینی سیلیکات ریزدانه به جای ماسه سیلیکا، مقاومت فشاری را بدون افت جذب صوت بهبود می‌بخشد [۱۰]. پولدر و همکاران (۲۰۱۸) روش لوله امیدانس را دقیق‌تر از آزمون "دو اتاق" برای سنجش افت انتقال صدا دانستند [۱۱]. چلنگران و همکاران (۱۳۹۸) نشان دادند جایگزینی ماسه با لاستیک بازیافتی در بتن، افت انتقال صدا را در اغلب بازه‌های فرکانسی کاهش می‌دهد [۱۲]. اسماعیلی و همکاران (۱۳۹۸) گزارش کردند استفاده از بتن سبک نوع سوم می‌تواند نفوذ صدا را تا ۲۶٪

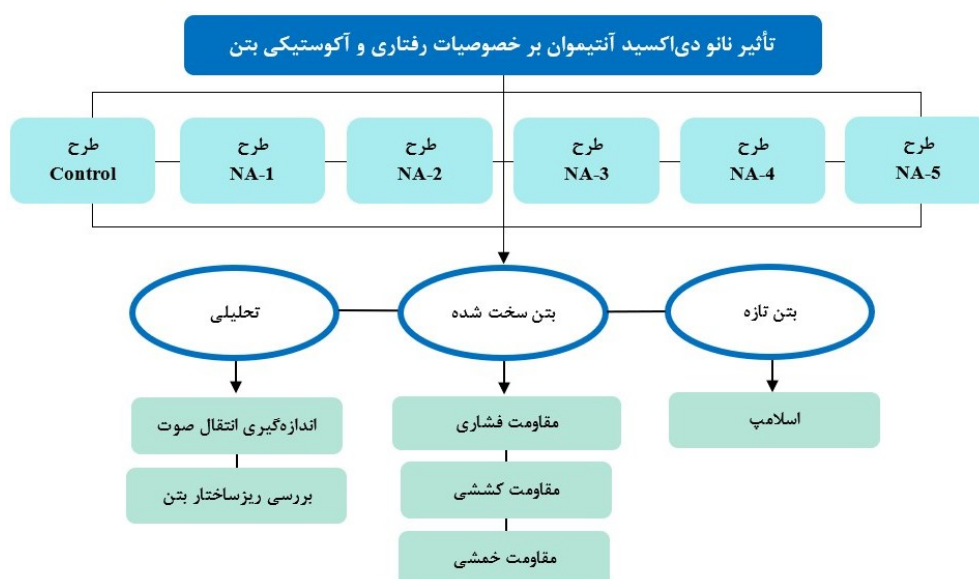
کاهش دهد [۱۳]. نادری و همکاران (۱۳۹۷) روش تابع انتقال را برای تعیین ضریب جذب صوت به دلیل دقت و صرفه جویی نسبت به روش موج ایستاده پیشنهاد کردند [۱۴]. بررسی های پیشین نشان می دهد استفاده از سنگدانه های سبک، افزایش تخلخل و ضخامت، افزودنی های مانند پودر آلومینیوم، فیبر سلولز و حتی مواد بازیافتی مانند لاستیک، می توانند جذب صوت بتن را بهبود دهند [۷-۱۴].

آنتیموان^۱ یک شبه فلز است که از نظر ظاهر و خواص فیزیکی شباهت زیادی به فلزات دارد، اما از لحاظ شیمیایی همچون فلزات واکنش نشان نمی دهد. این عنصر دارای هدایت الکتریکی و حرارتی پایین است و با عدد اتمی ۵۱ در جدول تناوبی قرار دارد. آنتیموان علاوه بر اینکه به عنوان اکسیدکننده عمل می کند و با بسیاری از فلزات واکنش می دهد [۱۶]. در سال ۲۰۱۶، طبق اعلام سازمان زمین شناسی آمریکا، چین با تولید ۷۷ درصدی، بزرگ ترین تولیدکننده آنتیموان در جهان بود و پس از آن، روسیه و تاجیکستان به ترتیب با سهم ۶/۹ و ۶/۲ درصد قرار داشتند [۱۷]. در ایران، معدن "سفیدآبه" مهم ترین منبع آنتیموان به شمار می رود که در ۳۰۰ کیلومتری شمال غرب زاهدان در استان سیستان و بلوچستان قرار دارد. ذخیره قطعی این معدن، ۴۵۰۰ تن کانسنگ با عیار ۳۷ درصد اعلام شده. ظرفیت سالانه استخراج اسمی این معدن، ۵۰۰ تن تعیین شده. معدن آنتیموان "تربت جام" به عنوان دومین معدن مهم آنتیموان ایران در ۴۵ کیلومتری شمال غرب تربت جام و محدوده روستای چشمه جوهر قرار دارد. این محدوده ۱۰ کیلومترمربع وسعت دارد و ذخیره قطعی آن ۱۲ هزار تن برآورد شده است. میزان استخراج سالانه این معدن ۱۵۰۰ تن بوده و کانسنگ آن از نوع سولفید آنتیموان با عیار ۲۵ درصد در سنگ بستر کربناته است [۱۸]. آنتیموان یکی از عناصری است که اضافه کردن آن به مصالح ساختمانی سنتی، می تواند بر ویژگی های آکوستیکی این مواد تأثیر بگذارد. تحقیقات گذشته نشان می دهد که افزودن ترکیبات آنتیموانی عمدتاً به دو منظور افزایش مقاومت در برابر شعله و بهبود جذب صوت انجام می شود. حضور آنتیموان در مصالح، خاصیت جذب صدا و جلوگیری از انتقال آن را عمدتاً با تغییر در تراکم، ساختار فیزیکی، قابلیت نفوذ هوا و همچنین ویژگی های شیمیایی متریال افزایش می دهد [۱۹]. در بخش فناوری های نوین، تحقیقات درباره افزودن نانو آنتیموان به بتن حاکی است این ماده در سنین اولیه (۷ روز) باعث افزایش ۵ تا ۱۵ درصدی مقاومت فشاری، در سنین ۱۴ تا ۲۸ روز بین ۱۰ تا ۲۵ درصد و در دوره های دیرتر نیز باعث بهبود دوام بتن نسبت به نمونه شاهد می شود. این ویژگی ها نانو آنتیموان را برای افزایش مقاومت و پایداری بتن مناسب می سازد [۲۰].

با وجود پیشرفت هایی که در بهبود عملکرد آکوستیکی بتن از طریق تولید بتن متخلخل حاصل شده، همچنان ابهامات زیادی در این زمینه وجود دارد. عمده ترین چالش استفاده از بتن متخلخل برای کاهش عبور صوت، کاهش مقاومت و دوام مکانیکی آن است که باعث می شود کاربری این نوع بتن در سازه هایی که نیازمند استحکام بالا هستند، محدود شود [۲۱]. از سوی دیگر، هرچند بتن یکی از پرکاربردترین مصالح ساختمانی است و ویژگی هایی همچون مقاومت در برابر آتش و دوام بالا را داراست، اما به دلیل خاصیت آکوستیکی ذاتی و قابلیت بازتاب صوت، معمولاً از عایق های صوتی برای کنترل انتقال و انتشار صدا در ساختمان ها استفاده می شود. چنین راهکاری هزینه ساخت و نگهداری را افزایش می دهد و محدودیت های بیشتری را بر طراحی فضاهای داخلی تحمیل می کند [۲۲]. هرچند افزودنی های مختلفی مانند پوکه، لاستیک بازیافتی، فیبر سلولزی و پودر آلومینیوم هم برای بهبود خواص مکانیکی و جذب صوت بتن استفاده شده اند، اما بررسی ها نشان می دهد پژوهش های جامع و کافی درباره استفاده از نانوترکیبات، به ویژه نانو دی اکسید آنتیموان، برای ایجاد بتنی با کارایی آکوستیکی و مکانیکی مناسب، انجام نشده است [۲۳]. در تحقیق حاضر، با توجه به این خلأ علمی و نیاز روزافزون به مصالحی که هم نقش سازه ای و هم نقش فنی در کنترل آلودگی صوتی داشته باشند، اهمیت استفاده از نانو دی اکسید آنتیموان دوچندان می شود. هدف اصلی تحقیق این است که با افزودن درصدهای وزنی مختلف از نانو دی اکسید آنتیموان به بتن، ضمن ایجاد خواص آکوستیکی برتر، مقاومت فشاری، کششی و خمشی بتن نیز افزایش یابد تا بتوان بتن ضد صوت را بدون آفت شاخص های مقاومتی به کار برد. نوآوری این تحقیق در آن است که با استفاده از نانو دی اکسید آنتیموان، نه تنها ضعف بتن های متخلخل در حفظ دوام برطرف شود، بلکه بدون نیاز به پوشش های اضافی یا عایق های مستقل، بتوان از بتن به عنوان مصالح ساختمانی چندمنظوره بهره برد. با این رویکرد، بتن مورد استفاده در سازه ها به تنهایی عملکرد آکوستیکی مطلوبی خواهد داشت و نیاز به استفاده از عایق برای کنترل صوت کاهش می یابد که

¹ Antimony

این امر می‌تواند تحولی در طراحی و ساخت سازه‌های مقاوم و آرامش‌بخش ایجاد کند. شکل شماره ۱ فلوجارت مراحل آزمایشگاهی این تحقیق را نشان می‌دهد.



شکل ۱ فلوجارت روند انجام تحقیق

۲- مواد و مصالح

۲-۱- شن

شن مصرفی جهت ساخت بتن مورد آزمایش در این تحقیق، مخلوط نخودی و بادامی با حداکثر اندازه ۱۹ میلیمتر می‌باشد و از معدن دوکوهک استان فارس تهیه شده است. وزن مخصوص ظاهری در حالت SSD ۲۶۳۰ کیلوگرم در هر متر مکعب و میزان جذب آب درشت دانه نیز برابر با ۱/۵٪ می‌باشد. جدول شماره ۱ سایر مشخصات فیزیکی این محصول را نشان می‌دهد.

جدول ۱ مشخصات شن مصرفی مورد استفاده در ساخت بتن [ماخذ: نویسندگان]

نوع سنگدانه	حداکثر قطر سنگدانه	میزان جذب آب	وزن مخصوص SSD
	mm	%	kg/m ³
مخلوط بادامی و نخودی	۱۹	۱/۵	۲۶۳۰

۲-۲- ماسه

ماسه مصرفی جهت ساخت بتن در این تحقیق از معادن موجود در منطقه دوکوهک فارس تهیه شده است. ماسه مصرفی دارای حداکثر اندازه اسمی ۰-۴/۷۵ میلیمتر و بوده که وزن مخصوص ظاهری در حالت SSD، ۲۶۰۰ کیلوگرم در متر مکعب و جذب آب ۲/۳٪ و مدول نرمی ۳/۱ می‌باشد. جدول شماره ۲ سایر مشخصات فیزیکی این محصول را نشان می‌دهد.

جدول ۲ مشخصات ماسه مصرفی مورد استفاده در ساخت بتن [ماخذ: نویسندگان]

نوع سنگدانه	حداکثر قطر سنگدانه	مدول نرمی	وزن مخصوص SSD	جذب آب
	mm	نرمی	kg/m ³	%

۲/۳	۲۶۰۰	۳/۱	۴/۷۵	ماسه
-----	------	-----	------	------

۲-۳- سیمان

سیمان مصرفی در این تحقیق تیپ ۲ فارس می باشد. چگالی این سیمان ۳/۱۰ گرم بر سانتیمتر مربع است. ساختار شیمیایی این سیمان در جدول شماره ۳ که منطبق بر شناسه منتشر شده از طرف شرکت سازنده این سیمان می باشد ارائه شده است.

جدول ۳ ساختار شیمیایی سیمان تیپ ۲ فارس

C ₃ S	CaO	SO ₃	MgO	FE ₂ O ₃	AL ₂ O ₃	SiO ₂
% ۲۲/۶۸	% ۶۰/۴۶	% ۱/۳۵	% ۲/۲۰	% ۳/۹۵	% ۴/۷۰	% ۲/۹۰

۲-۴- نانو دی اکسید آنتیموان

نانو دی اکسید آنتیموان مصرفی به صورت اکسید و به شکل پودر مورد استفاده قرار گرفت. این محصول ساخت شرکت Alpha Chemicals کشور آلمان می باشد و دارای خلوص بیش از ۹۹٪ و حداکثر اندازه ۱۵۰ نانومتر می باشد. سایر مشخصات فیزیکی و شیمیایی این محصول مطابق جدول شماره ۳ و ۴ می باشد. همچنین شکل شماره ۲ مربوط به نانو آنتیموان مصرفی می باشد.

جدول ۴ خصوصیات شیمیایی نانو دی اکسید آنتیموان

نام عنصر	خلوص	حداکثر اندازه	چگالی	سختی موهس	نقطه ذوب	مدول یانگ
Sb ₂ O ₃	% ۹۹/۹	۱۵۰ نانومتر	۵/۶۷ g/cm ³	۳	۶۳۱ سانتیگراد	۵۵ گیگا پاسکال

جدول ۵ خصوصیات فیزیکی نانو دی اکسید آنتیموان

نام عنصر	مقدار %
Sb ₂ O ₃	۹۹/۹
Fe	آهن ۰/۰۰۳
Cu	مس ۰/۰۰۵
As	آرسنیک ۰/۰۰۵
Pb	سرب ۰/۰۵
Acid-insoluble	اسید نامحلول ۰/۰۰۵



شکل ۲ نانو دی اکسید آنتیموان مصرفی

۲-۶- آبر روان کننده

استفاده از محصولات روان کننده یا کاهنده آب، به جهت افزایش کیفیت خصوصیات مکانیکی و دستیابی به روانی مطلوب بسیار مرسوم بوده و مورد استفاده قرار می گیرد [۲۵]. در این تحقیق برای ساخت بتن و تامین روانی مدنظر از آبر روان کننده بر پایه پلی-کربوکسیلات، استفاده گردید. خصوصیات فیزیکی این ماده مطابق جدول شماره ۶ می باشد. همچنین شکل شماره ۳ محصول مصرفی را نشان می دهد.

جدول ۶ خصوصیات فیزیکی ابر روان کننده بر پایه کربوکسیلات					
وزن مخصوص	استاندارد	یون کلر	PH	حالت فیزیکی	مقدار جایگزینی
۱/۱ gr/cm ³	ASTM C1017	کمتر از ۰/۱ درصد	۶	مایع	۱ تا ۳٪ وزن سیمان

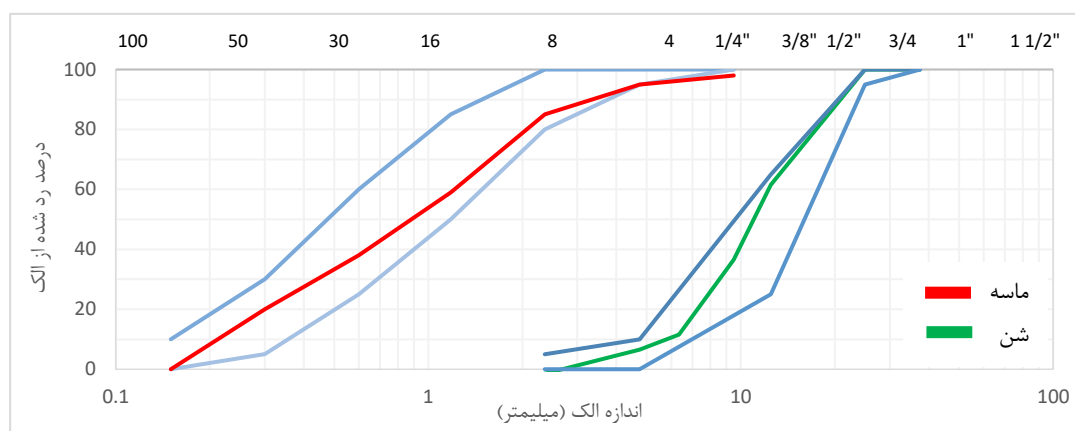


شکل ۳ ابر روان کننده مصرفی در این تحقیق

۳- دانه بندی

در این تحقیق آزمایش دانه بندی سنگدانه طبق استاندارد ASTM-C136 بوسیله الک های سیمی استاندارد انجام شد. با محاسبه مقادیر درصد تجمعی میزان عبور کرده از هر الک که بر اساس شماره بندی استاندارد روی یکدیگر قرار گرفته اند، می توان این مقادیر را با

منحنی استاندارد ASTM-C33 مقایسه نمود [۲۶]. در منحنی دانه بندی، محور عمودی نمایش دهنده درصد تجمعی عبور داده شده از هر الک و محور افقی بیانگر اندازه یا شماره الک می باشد.



شکل ۴ دانه بندی شن و ماسه مورد استفاده جهت ساخت بتن و انطباق آن با محدوده استاندارد ASTM-C33

۴- برنامه آزمایشگاهی و طرح مخلوط

در این تحقیق برای یافتن مقدار بهینه دوز مصرفی نانو مواد در بتن ابتدا اقدام به ساخت نمونه های اولیه گردید. بدین ترتیب نمونه های بتنی با ابعاد $10 \times 10 \times 10$ سانتیمتر با نانو اکسید آنتیموان در نسبت های مختلف وزنی ۰، ۱، ۲ و ۳ درصد عیار مصرفی سیمان ساخته شد و پس از ۷ روز عمل آوری تحت آزمایش مقاومت فشاری قرار گرفت. نتایج بدست آمده در این بخش نشان داد که مقدار بهینه نانو مواد در بتن کمتر از ۱ درصد عیار سیمان مصرفی می باشد. همچنین پیشنهاد تحقیقات گذشته، صحت این نتیجه را تایید می کند [۲۴-۲۰]. بدین ترتیب در گام بعدی جهت انجام آزمایشات اصلی از نانو اکسید آنتیموان در نسبت های مختلف وزنی ۰، ۰/۱، ۰/۳، ۰/۵، ۰/۷، ۰/۹ و ۱ درصد عیار سیمان استفاده شد. در این تحقیق استاندارد طرح مخلوط بر اساس ACI-211 در نظر گرفته شد. عیار سیمان مصرفی ۳۵۰ کیلوگرم در هر متر مکعب و نسبت آب به سیمان ۰/۳۵ در نظر گرفته شد. از آنجایی که نانو مواد نیاز به آب را در بتن افزایش می دهد از آب روان کننده بر پایه کربوکسیلات به میزان ۱ درصد وزنی سیمان استفاده شد. حداکثر اندازه اسمی درشت دانه ۱۹ میلیمتر و در شرایط اشباع با سطح خشک (حالت SSD) مورد استفاده قرار گرفت. نامگذاری نمونه های مورد آزمایش مطابق جدول شماره ۷ می باشد.

جدول ۷ میزان مصالح مصرفی و طرح مخلوط برای ساخت هر متر مکعب بتن

ردیف	نام	سیمان	شن	ماسه	نانو دی اکسید آنتیموان	نسبت نانو دی-اکسید آنتیموان	آب روان کننده	آب
		kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	%	kg/m ³	lit/m ³
۱	Control				۰	۰		
۲	NA-1				۰/۳۵	۰/۱		
۳	NA-2	۳۵۰	۶۰۰	۱۲۰۰	۱/۰۵	۰/۳	۳/۵	۱۲۲
۴	NA-3				۱/۷۵	۰/۵		
۵	NA-4				۲/۴۵	۰/۷		
۶	NA-5				۳/۱۵	۰/۹		

در این تحقیق برای تهیه سنگدانه با وضعیت اشباع با سطح خشک (حالت SSD) ابتدا سنگدانه ها را کاملاً به حالت مرطوب درآورده، سپس طی مدت ۵ ساعت در هوای آزاد در دمای ۳۰+ درجه سانتی گراد قرار داده تا سطح آن کاملاً خشک شود. در این حالت

سنگدانه نه آب اضافه‌ای به بتن می‌دهد و نه آب بتن را جذب می‌نماید. سپس سنگدانه را در همین وضعیت درون مخلوط‌کن ریخته و به مدت ۱ دقیقه با یکدیگر مخلوط شدند. پس از آن سیمان و نصف آب در نظر گرفته شده اضافه گردید و ۲ دقیقه دیگر اختلاط در مخلوط-کن انجام گرفت. لازم به ذکر است که برای پخش یکنواخت و موثر نانو مواد در بتن، نانو اکسید آنتیموان را با محلول آبروان‌کننده مخلوط کرده و با همزن مکانیکی با دور بالا به مدت ۱ دقیقه ترکیب شدند تا کاملاً محلول همگن و رقیقی بدست آمد. سپس محلول بدست آمده به درون مخلوط‌کن بتن ریخته و پس از آن آب باقیمانده اضافه گردید و به مدت ۳ دقیقه این ترکیب با یکدیگر مخلوط شدند. پس از آن بلافاصله آزمایش اسلامپ انجام شده و سپس قالب‌گیری شدند. به منظور جلوگیری از چسبندگی بتن به جدار قالب، ابتدا جداره‌های داخلی قالب با روغن مخصوص قالب که بر پایه آب می‌باشد، آغشته گردید. سپس بتن در سه لایه در قالب ریخته شد و در هر لایه بوسیله رامر، ۲۵ ضربه دورانی شکل زده شد تا تراکم لازم در بتن ایجاد شود. در نهایت نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد قرار داده شده و بعد از آن به مدت ۷، ۲۸ و ۹۰ روز در حوضچه آب عمل‌آوری شدند. در این تحقیق مجموعاً ۷۲ نمونه ساخته و قالب‌گیری شد که از این تعداد ۵۴ نمونه مکعبی ۱۵x۱۵x۱۵ سانتیمتری برای آزمایش مقاومت فشاری در سنین ۷ و ۲۸ و ۹۰ روزه، ۶ نمونه استوانه ۳۰x۱۵ سانتیمتری برای آزمایش مقاومت کششی در سن ۲۸ روزه، ۶ نمونه منشوری ۵۰x۱۰x۱۰ سانتیمتری برای آزمون مقاومت خمشی در سن ۲۸ روزه و ۶ نمونه استوانه ۱۰x۵ سانتیمتری برای تعیین ضریب انتقال صوت بتن در سن ۲۸ روزه در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است که تهیه نمونه برای آزمایش انتقال صوت بصورت برش خورده به ابعاد مذکور تهیه شده است. سایر جزییات برنامه آزمایشگاهی این تحقیق به شرح جدول شماره ۸ می‌باشد.

جدول ۸ برنامه آزمایشگاهی این تحقیق شامل نوع آزمایشات، استاندارد آزمایش، ابعاد نمونه مورد آزمایش و تعداد نمونه

ردیف	نام آزمایش	استاندارد آزمایش	تعداد نمونه	ابعاد نمونه	نوع نمونه
۱	الک سنگدانه	ASTM-C136	۱ سری	۳ کیلوگرم	توده
۲	دانه بندی سنگدانه	ASTM-C33	۱ سری	۳ کیلوگرم	توده
۴	تعیین جذب آب و چگالی سنگدانه	ASTM-C128	۱ سری	۱ کیلوگرم	توده
۵	اسلامپ	ASTM-C143	۱ سری	-	توده
۷	مقاومت فشاری	BS-EN-12390-3	۵۴ عدد	طول: ۱۵ cm عرض: ۱۵ cm ارتفاع: ۱۵ cm	مکعبی
۸	مقاومت کششی	ASTM-C496	۶ عدد	قطر: ۱۵ cm ارتفاع: ۳۰ cm	استوانه
۹	مقاومت خمشی	ASTM-C293	۶ عدد	طول: ۵۰ cm ارتفاع: ۱۰ cm عرض: ۱۰ cm	منشوری
۱۰	انتقال صوت بتن	ASTM-E2611	۶ عدد	قطر: ۱۰ cm ضخامت: ۵ cm	استوانه



شکل ۵ تصاویری از مخلوط بتن به همراه محلول نانو دی اکسید آنتیموان به همراه ابر روان کننده

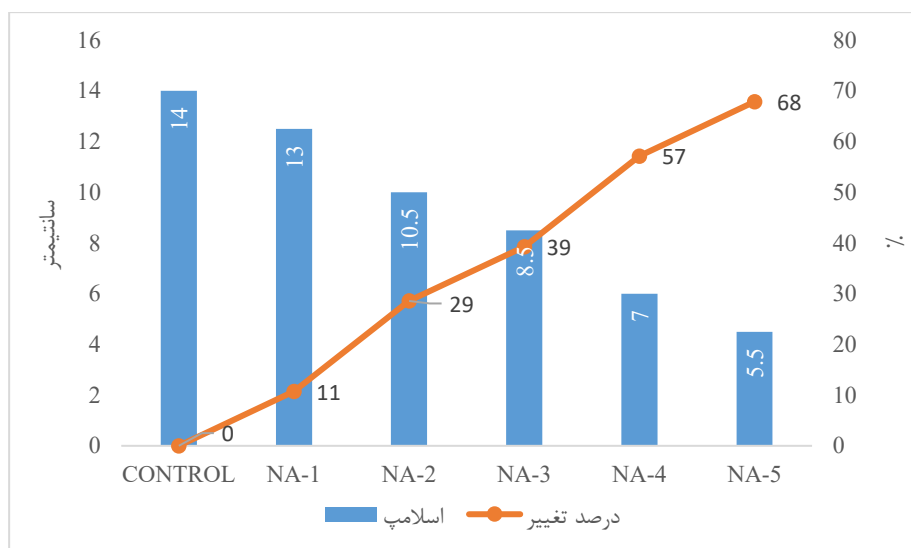
۵- یافته‌ها

۵-۱- اسلامپ

اسلامپ بتن یکی از آزمایش‌های مهم در کنترل کیفیت بتن است که برای سنجش روانی و قابل استفاده بودن آن انجام می‌شود. تغییرات در اسلامپ بتن به عواملی مانند مواد افزودنی، نسبت آب به سیمان و اندازه ذرات مصرفی که در ساخت بتن استفاده می‌شوند بستگی دارد [۲۸]. نانو ذرات به دلیل سطح تماس بالا و اثر جذب آب می‌توانند باعث کاهش اسلامپ بتن شوند. در این حالت، ممکن است برای جبران کاهش اسلامپ، نیاز به افزودن مقدار بیشتری آب یا روان‌کننده‌های بتن باشد [۲۹]. نانو آنتیموان به عنوان یک افزودنی نانوذره‌ای می‌تواند بر ویژگی‌های اسلامپ بتن تاثیرگذار باشد. برخی از مطالعات نشان داده‌اند که اضافه کردن نانوذرات به بتن ممکن است باعث کاهش اسلامپ شود، زیرا نانوذرات به دلیل اندازه کوچکی که دارند، می‌توانند باعث افزایش خواص چسبندگی سیمان و دانه‌های شن و ماسه شوند [۳۰]. این افزایش چسبندگی باعث کاهش اسلامپ بتن می‌گردد. نتایج این تحقیق نشان داد که در صورت استفاده از مقادیر زیاد نانو آنتیموان، اسلامپ بتن کاهش می‌یابد. زیرا ذرات نانو آنتیموان میزان بیشتری آب جذب می‌کند. بطوریکه اسلامپ بتن در طرح NA-1-5 نسبت به طرح کنترل به ترتیب ۱۱٪، ۲۹٪، ۳۹٪، ۵۷٪ و ۶۸٪ کاهش یافته است. جدول و نمودار شماره ۹ و ۶ میزان اسلامپ نمونه‌ها را با یکدیگر مقایسه می‌کند.

جدول ۹ میزان اسلامپ نمونه‌های مختلف

نام طرح	اسلامپ	تغییرات
	cm	%
CONTROL	۱۴	۰
NA-1	۱۳	۱۱
NA-2	۱۰/۵	۲۹
NA-3	۸/۵	۳۹
NA-4	۷	۵۷
NA-5	۵/۵	۶۸



شکل ۶ مقایسه میزان اسلامپ نمونه‌های مورد آزمایش



شکل ۷ تصویری از آزمایش اسلامپ بتن

۵-۲- مقاومت فشاری و گیرش بتن

مقاومت فشاری بتن، یکی از مهم‌ترین شاخص‌های عملکرد بتن است که نشان دهنده توانایی بتن در تحمل بارهای فشاری است. این مقاومت به عوامل مختلفی از جمله نوع سیمان، نسبت آب به سیمان، نوع و مقدار سنگدانه‌ها، افزودنی‌های شیمیایی و معدنی و همچنین شرایط عمل آوری بتن بستگی دارد [۳۱]. در مقادیر کم، نانو آنتیموان می‌تواند به عنوان یک ماده پوزولانی عمل کرده و باعث افزایش مقاومت فشاری بتن در سنین اولیه و بلند مدت شود. این افزایش مقاومت، ناشی از واکنش پوزولانی ذرات نانو با هیدروکسید کلسیم (Ca(OH)_2) حاصل از هیدراتاسیون سیمان است. این واکنش، ترکیبات مقاوم‌تری را به وجود می‌آورد و ساختار ریزدانه‌تری را در ماتریس سیمان ایجاد می‌کند. اما در مقادیر زیاد، نانو آنتیموان باعث تجمع ذرات و کاهش کارایی بتن می‌شود و در نتیجه، مقاومت فشاری آن کاهش می‌یابد. همچنین، جذب آب توسط ذرات نانو در مقادیر زیاد بر فرآیند هیدراتاسیون سیمان تأثیر منفی می‌گذارد و باعث کاهش مقاومت می‌شود.

نانو دی اکسید آنتیموان سرعت هیدراتاسیون سیمان را تحت تأثیر قرار می‌دهد. از آنجا که نانو ذرات سطح بیشتری برای واکنش دارند، باعث تسریع فرآیند هیدراتاسیون می‌شوند. بطوریکه در سنین ۱ تا ۷ روزه نانو آنتیموان، به ویژه در مقادیر کم، می‌تواند سرعت هیدراتاسیون سیمان را افزایش داده و باعث افزایش مقاومت فشاری بتن در سنین اولیه شود. این امر برای پروژه‌هایی که نیاز به مقاومت سریع دارند، بسیار مفید است. در سنین ۷ تا ۲۸ روزه، نانو آنتیموان به واکنش پوزولانی خود ادامه داده و باعث افزایش بیشتر مقاومت

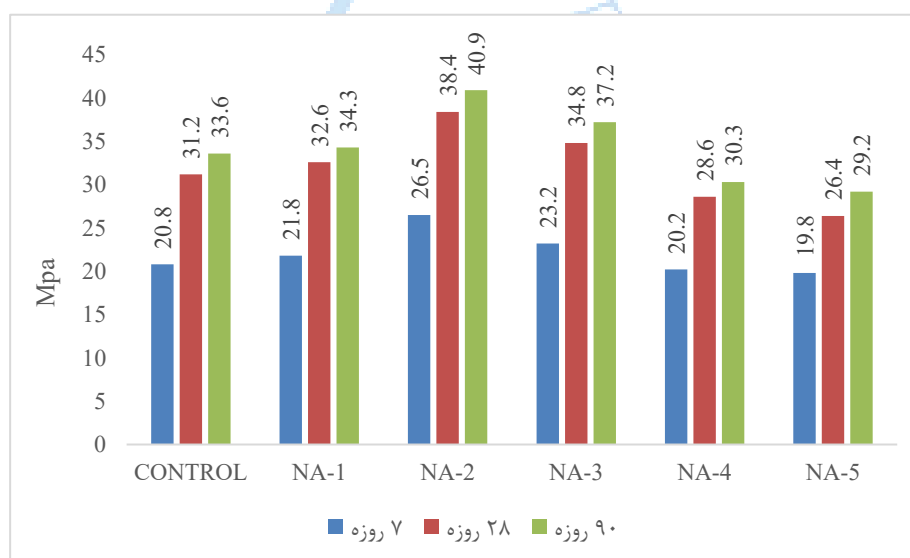
فشاری بتن می‌شود. این واکنش، منجر به تولید ترکیبات سیمانی پایداری می‌شود و ساختار ریزدانه تری را در بتن ایجاد می‌کند. در سنین ۲۸ تا ۹۰ روزه، نانو آنتیموان می‌تواند همچنان به بهبود ساختار ریزدانه بتن و افزایش مقاومت فشاری آن ادامه دهد. همچنین می‌تواند با کاهش نفوذپذیری بتن، به افزایش دوام و پایداری آن نیز کمک کند. جدول و نمودار شماره ۸ و ۱۰ میزان مقاومت فشاری نمونه‌ها را در سنین مختلف نشان می‌دهد.



شکل ۸ تصاویری مربوط به آزمایش مقاومت فشاری بتن

جدول ۱۰ مقاومت فشاری نمونه‌های مختلف در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه و مقایسه درصد تغییرات آن

میزان تغییرات	مقاومت فشاری معادل استوانه‌ای استاندارد						مقاومت فشاری مکعبی			نام طرح
	روزه ۹۰	روزه ۲۸	روزه ۷	روزه ۹۰	روزه ۲۸	روزه ۷	روزه ۹۰	روزه ۲۸	روزه ۷	
	مگا پاسکال						مگا پاسکال			
	-	-	-	۲۸/۶	۲۶/۲	۱۵/۸	۳۳/۶	۳۱/۲	۲۰/۸	CONTROL
	۲	۴	۵	۲۹/۳	۲۷/۶	۱۶/۸	۳۴/۳	۳۲/۶	۲۱/۸	NA-1
	۲۲	۲۳	۲۷	۳۵/۹	۳۳/۴	۲۱/۵	۴۰/۹	۳۸/۴	۲۶/۵	NA-2
	۱۱	۱۲	۱۲	۳۲/۲	۲۹/۸	۱۸/۲	۳۷/۲	۳۴/۸	۲۳/۲	NA-3
	-۱۰	-۸	-۳	۲۵/۳	۲۳/۶	۱۵/۲	۳۰/۳	۲۸/۶	۲۰/۲	NA-4
	-۱۳	-۱۵	-۵	۲۴/۲	۲۱/۴	۱۴/۸	۲۹/۲	۲۶/۴	۱۹/۸	NA-5



شکل ۹ مقایسه مقاومت فشاری نمونه‌ها در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه

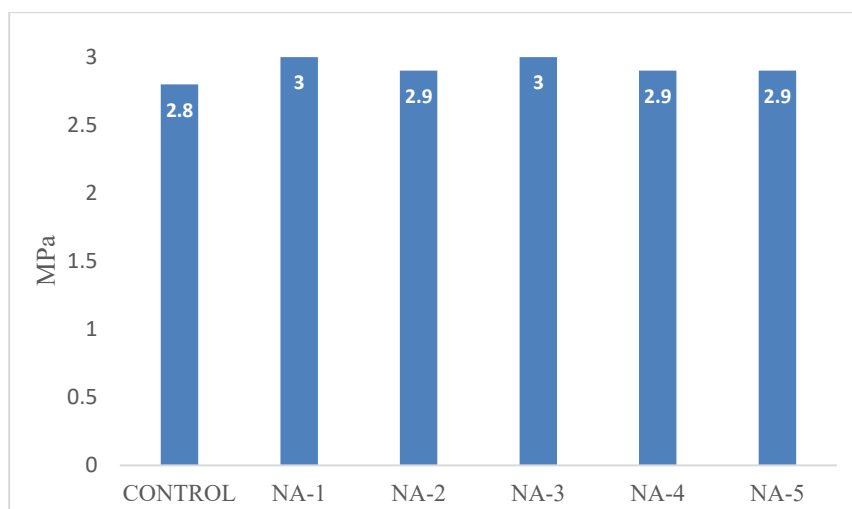
۵-۳- مقاومت کششی

مقاومت کششی بتن، یکی از خواص مکانیکی مهم آن است که نشان دهنده توانایی بتن در تحمل بارهای کششی است. مقاومت کششی بتن به مراتب کمتر از مقاومت فشاری آن است و این ضعف یکی از چالش‌های اساسی در بتن محسوب می‌شود. در حالیکه استفاده از فناوری نانو به دلیل پتانسیل بالای آن‌ها برای بهبود خواص مکانیکی و دوام بتن، بسیار مورد توجه قرار گرفته است [۳۱]. اما نتایج این بخش از آزمایشات نشان داد که استفاده از نانو دی اکسید آنتیموان در بتن تاثیر محسوسی بر روی مقاومت کششی بتن ندارد. شکل و نمودار شماره ۱۰ و ۱۱ میزان مقاومت کششی نمونه‌ها را نشان می‌دهد. میزان اختلاف کمی که بین نتایج وجود دارد، ناشی از خطای آزمایشگاهی می‌باشد.

ذرات نانو آنتیموان، به دلیل ابعاد بسیار ریز خود، قادرند فضاهای خالی (منافذ موئین) موجود در خمیر سیمان را به طور موثری پر کنند. این عمل، باعث افزایش تراکم و کاهش نفوذپذیری بتن می‌شود. اما از آنجایی که ناحیه بین خمیر سیمان و سنگدانه اغلب به عنوان نقطه ضعف بتن شناخته می‌شود، نانو ذرات آنتیموان نتوانسته این ناحیه را تقویت کرده و چسبندگی بین خمیر و سنگدانه را افزایش دهند.

جدول ۱۱ مقایسه مقاومت کششی نمونه‌های مورد آزمایش

ردیف	نام طرح مخلوط	مقاومت کششی (مگاپاسکال)
۱	CONTROL	۲۸ روزه
۲	NA-1	۲/۸
۳	NA-2	۳
۴	NA-3	۲/۹
۵	NA-4	۳
۶	NA-5	۲/۹



شکل ۱۰ مقایسه مقاومت کششی نمونه‌های مورد آزمایش



شکل ۱۱ تصاویری از آزمایش مقاومت کششی بتن

۴-۵- مقاومت خمشی

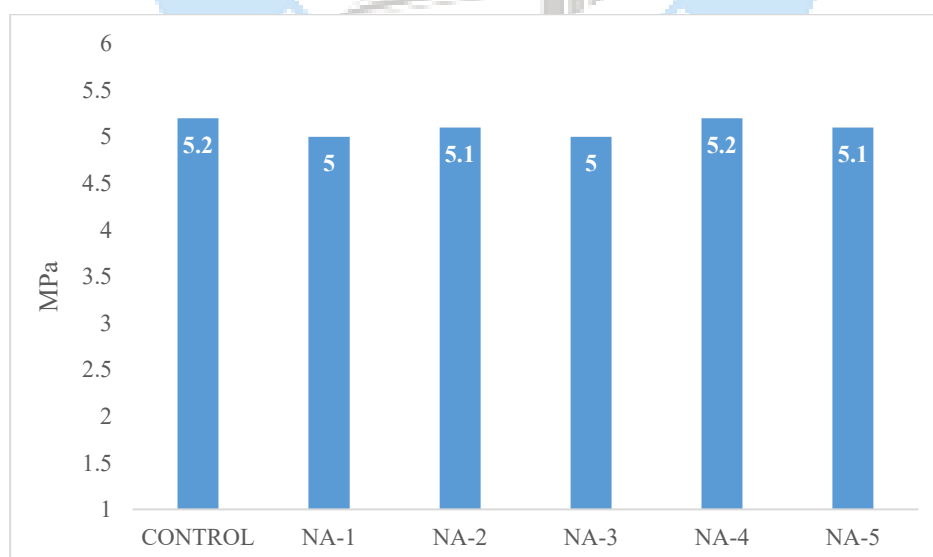
نتایج این بخش از آزمایش‌ها نشان داد که افزودن نانو دی‌اکسید آنتیموان تأثیر قابل توجهی بر مقاومت خمشی بتن نخواهد داشت. به طور کلی، نانوذرات به دلیل سطح ویژه بالا می‌توانند خواص مکانیکی بتن را تحت تأثیر قرار دهند و از طریق بهبود میکروساختار بتن، ماتریس سیمانی را بهینه و آن را چگال‌تر کنند. اما به نظر می‌رسد که نانو دی‌اکسید آنتیموان، به دلیل خصوصیات ذاتی یا نحوه تماس با سایر اجزای بتن، تأثیر مستقیمی بر مقاومت خمشی نداشته است [۳۳]. مقاومت خمشی، بیشتر به پیوستگی بین خمیر سیمان و سنگدانه‌ها و انعطاف ترکیب بتن بستگی دارد و به نظر می‌آید حضور نانو دی‌اکسید آنتیموان نتوانسته این پیوستگی را بهبود بخشد. از عوامل احتمالی عدم تأثیر می‌توان به میزان استفاده کمتر از حد بهینه، تفاوت در تأثیرگذاری مکانیکی نانوذرات مختلف و یا عدم تعامل مناسب این ماده با ماتریس سیمانی اشاره کرد [۳۴]. جدول و شکل شماره ۱۲ و ۱۳ مقاومت خمشی نمونه‌های مورد تحقیق را نشان می‌دهد. میزان اختلاف کمی که بین نتایج وجود دارد ناشی از خطای آزمایشگاهی می‌باشد.



شکل ۱۲ تصاویری مربوط به آزمایش مقاومت خمشی بتن

جدول ۱۲ مقایسه مقاومت خمشی نمونه‌های مورد آزمایش

ردیف	نام طرح مخلوط	نیروی وارده	مقاومت خمشی (مگاپاسکال)
		کیلوگرم	۲۸ روزه
۱	CONTROL	۱۰۵۳	۵/۲
۲	NA-1	۱۰۱۱	۵
۳	NA-2	۹۵۰	۵/۱
۴	NA-3	۹۱۸	۵
۵	NA-4	۸۶۳	۵/۲
۶	NA-5	۸۰۰	۵/۱



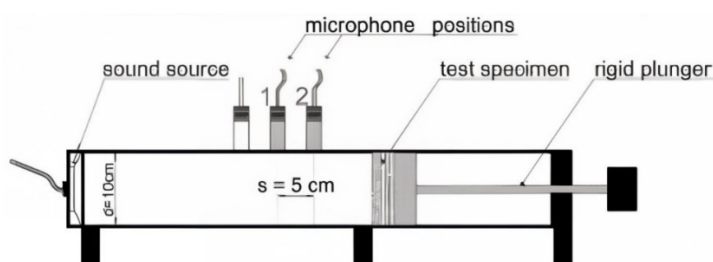
شکل ۱۳ مقایسه مقاومت خمشی نمونه‌های مورد آزمایش

۵-۵- انتقال صوت

آزمایش افت انتقال صوت با استفاده از لوله امپدانس به منظور بررسی دقیق خواص صوتی و آکوستیکی مصالح مختلف انجام می‌شود. این آزمایش به ویژه برای سنجش میزان کارایی مواد در جلوگیری از انتقال صدا یا کاهش شدت آن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. هدف اصلی این آزمایش، اندازه‌گیری کاهش شدت صدا در هنگام عبور از ماده‌ای خاص (مانند دیوار، پنجره یا هر نوع عایق دیگر) است. داده‌های به‌دست‌آمده می‌توانند در طراحی ساختمان‌ها، سازه‌ها و محصولات صنعتی که به ویژگی‌های آکوستیکی خاص نیاز دارند، به کار روند [۳۵]. یکی از چالش‌های بزرگ در استفاده از این دستگاه، آماده‌سازی نمونه‌ها به‌ویژه در مواردی چون بتن است که نیاز به قالب‌گیری بسیار دقیق دارد و ممکن است زمان‌بر باشد. به‌طور کلی، استفاده از لوله امپدانس به دلیل دقت بالا و توانایی انجام تحلیل‌های دقیق و معتبر در تحقیقات آکوستیکی بسیار مفید است [۳۶]. در این تحقیق، به منظور محاسبه ضریب افت انتقال صوت در بتن، از دستگاه لوله امپدانس ساخت شرکت BSW استفاده شده که مطابق با استاندارد ASTM-E2611 طراحی و ساخته شده است. این دستگاه شامل دو استوانه با قطرهای متفاوت و سطحی یکنواخت است. لوله امپدانس با قطر ۱۰۰ میلی‌متر برای ارزیابی خواص صوتی در بازه فرکانسی ۶۳ هرتز تا ۱۶۰۰ هرتز و لوله با قطر ۳۰ میلی‌متر برای ارزیابی در بازه فرکانسی ۱۶۰۰ هرتز تا ۶۳۰۰ هرتز طراحی شده است. علاوه بر این، این دستگاه شامل یک میکروفون قبل از نمونه و سه میکروفون در موقعیت‌های مختلف پس از قرارگیری نمونه بتن می‌باشد. در انتهای هر لوله، منبع صوتی وجود دارد و این منابع صوت و میکروفون‌ها به یک سیستم آنالیز فرکانس دیجیتال متصل هستند که امکان تجزیه و تحلیل خودکار داده‌ها را فراهم می‌آورد. شایان ذکر است که بتن مورد آزمایش با قطر ۱۰۰ میلی‌متر و ضخامت ۵۰ میلی‌متر بود. در طول آزمایش، عوامل محیطی نظیر دما، رطوبت نسبی و فشار هوا باید تحت کنترل باشند، زیرا این عوامل تأثیر قابل توجهی بر انتقال صوت دارند و باید در محاسبات لحاظ شوند [۳۶]. این تحقیق طبق استاندارد ASTM-E2611 در دمای ۲۷ درجه سانتی‌گراد، با رطوبت نسبی ۲۸٪، چگالی هوای معادل ۱ کیلوگرم بر متر مکعب و با سرعت صوت ۳۵۰ متر بر ثانیه صورت گرفت. در ابتدا، دستگاه امپدانس فرکانس‌های صوتی متنوعی را با شدت ۱۲۰ دسی‌بل (dB) تولید کرده و این صداها را به‌عنوان نویز از طریق بلندگو به داخل لوله منتشر نمود. سپس با اندازه‌گیری فشار صوت در نقاط نصب میکروفون میزان افت انتقال صوت از مصالح مختلف محاسبه گردید. در این روش، کمیت مورد نظر فشار صوت حداکثر و حداقل موج صوتی مربوط به تابش و بازتاب است که با اندازه‌گیری تراز فشار صوت و انجام محاسبات مربوطه، ضریب جذب صوتی نمونه تعیین می‌شود. این آزمایش با همکاری دانشگاه صنعتی امیرکبیر تهران انجام شده است. شکل شماره ۱۴ تصاویر از روند آزمایش و شکل شماره ۱۵ برش عرضی برای نمایش جزئیات لوله امپدانس را نشان می‌دهد.

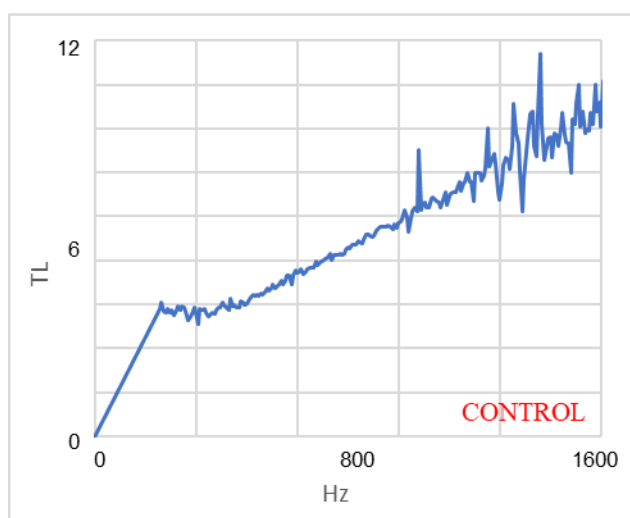


شکل ۱۴ برشکاری، آماده‌سازی و آزمایش افت انتقال صوت با لوله امپدانس

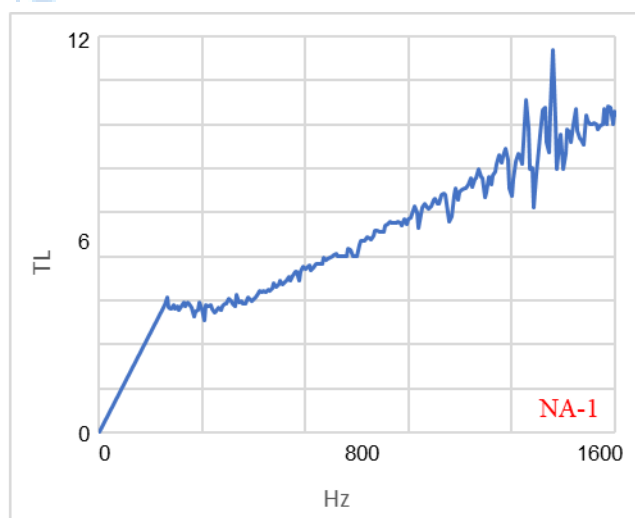


شکل ۱۵ برش عرضی لوله امپدانس جهت نمایش جزئیات درون دستگاه

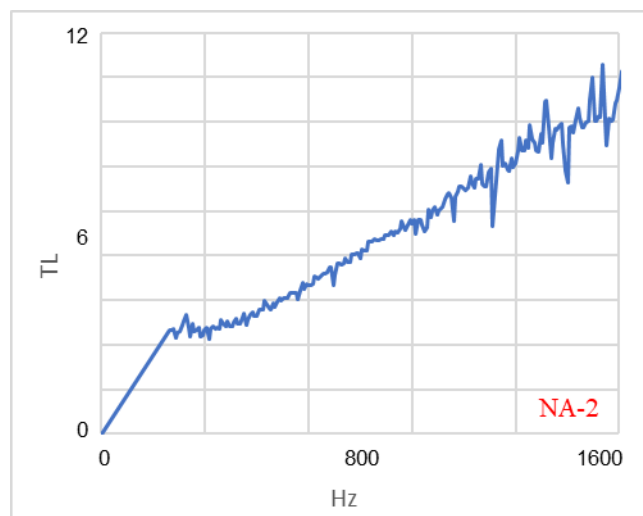
شکل شماره ۱۶ میزان تغییرات آفت انتقال صوت (بر حسب دسی بل) در بتن نسبت به فرکانس (بر حسب هرتز) را نشان می‌دهد. این تصویر شامل ۶ نمودار است که به ترتیب میزان آفت انتقال صوت نمونه بتن طرح 5, 4, 3, 2, NA-1, Control را نشان می‌دهد. محور افقی (X) نشان دهنده فرکانس صوت بر حسب هرتز (Hz) است که محدوده فرکانسی مورد بررسی بر حسب هرتز را شامل می‌شود. محور عمودی (Y) نشان دهنده ضریب آفت انتقال صوت است که میزان کاهش انرژی صوت در هنگام عبور از بتن را مشخص می‌کند. به طور کلی، آفت انتقال صوت بتن در این محدوده فرکانسی نسبتاً پایین است و با افزایش فرکانس، آفت انتقال صوت نیز افزایش می‌یابد، اما این افزایش یکنواخت نیست. در نمودار CONTROL آفت انتقال صوت از مقدار حدود ۲ دسی بل در فرکانس‌های پایین آغاز شده و به تدریج به ۱۰ دسی بل در ۵۰۰ هرتز می‌رسد. این رفتار نشان‌دهنده پایداری نسبی در افزایش آفت انتقال صوت بوده و عملکرد یکنواختی را ارائه می‌دهد. نمودار NA-1,2 نیز روند مشابهی دارد، اما میزان آفت در فرکانس‌های پایین حدود ۱/۵ دسی بل است و تا ۹ دسی بل در فرکانس‌های بالاتر افزایش پیدا می‌کند. رفتار نمودار NA-2، نمایانگر عملکرد صوتی با ثبات است، اما آفت کمتری نسبت به نمودار NA-1 دارد. در نمودار NA-3، افزایش آفت انتقال صوت آشکارتر است. به طوری که از مقدار ۲/۵ دسی بل در فرکانس‌های پایین به بیش از ۱۳ دسی بل در فرکانس‌های نزدیک به ۵۰۰ هرتز می‌رسد. این امر نشان می‌دهد که این نمونه بتن عملکرد صوتی بهتری به‌ویژه در فرکانس‌های بالا ارائه می‌دهد. نمودار NA-4 نیز مشابه نمودار NA-3 است، اما تغییرات ناگهانی در ناحیه بالای ۴۰۰ هرتز مشاهده می‌شود. به طوری که آفت انتقال صوت از حدود ۲ دسی بل در فرکانس پایین‌تر به حدود ۱۱ دسی بل می‌رسد. این تغییرات ناگهانی ممکن است به دلیل تفاوت‌های ساختاری یا شرایط آزمایش رخ داده باشد. نمودار NA-5 عملکرد منحصر به فردی نشان می‌دهد. از میزان آفت انتقال صوت ۱ دسی بل در فرکانس‌های پایین شروع شده و تا ۱۱ دسی بل در فرکانس‌های بالاتر افزایش می‌یابد، که این نشان‌دهنده عملکرد مؤثرتر این نمونه در کاهش انتقال صوت است.



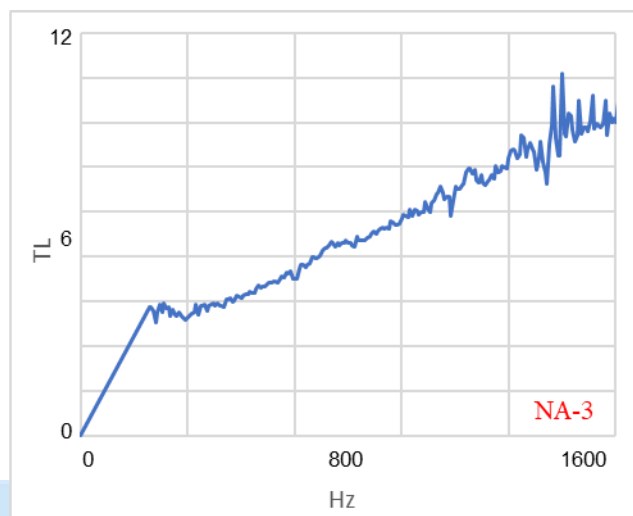
الف) طرح CONTROL



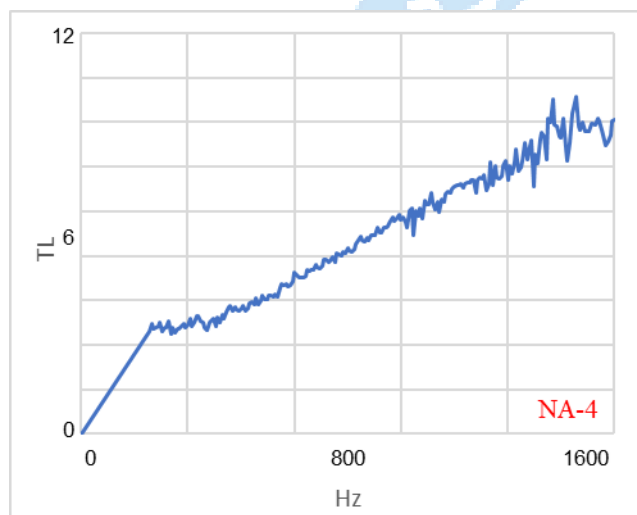
ب) طرح NA-1



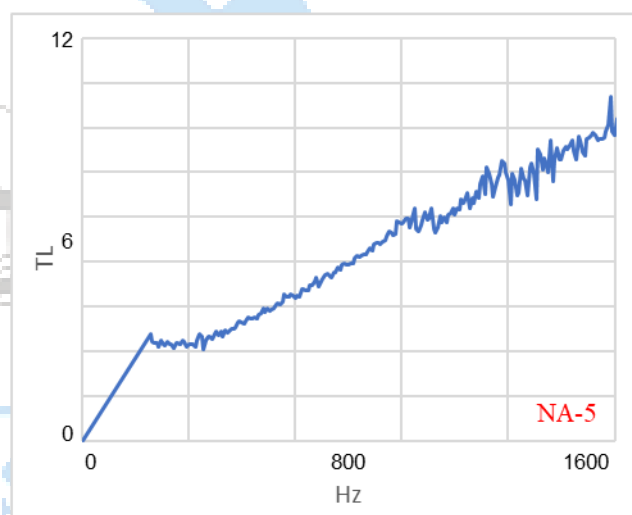
ج) طرح NA-2



د) طرح NA-3



ه) طرح NA-4



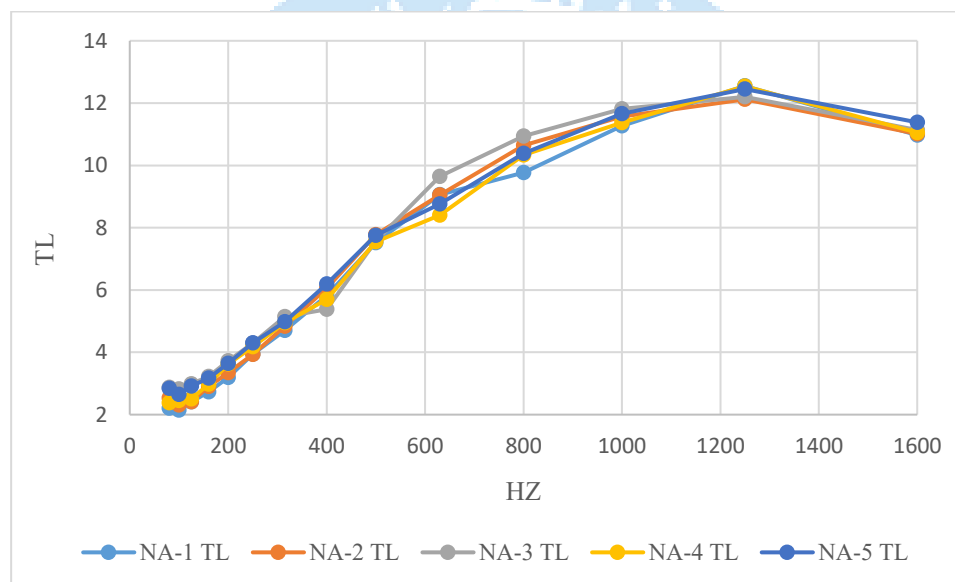
و) طرح NA-5

شکل ۱۶ آفت انتقال صوت در فرکانس‌های مختلف

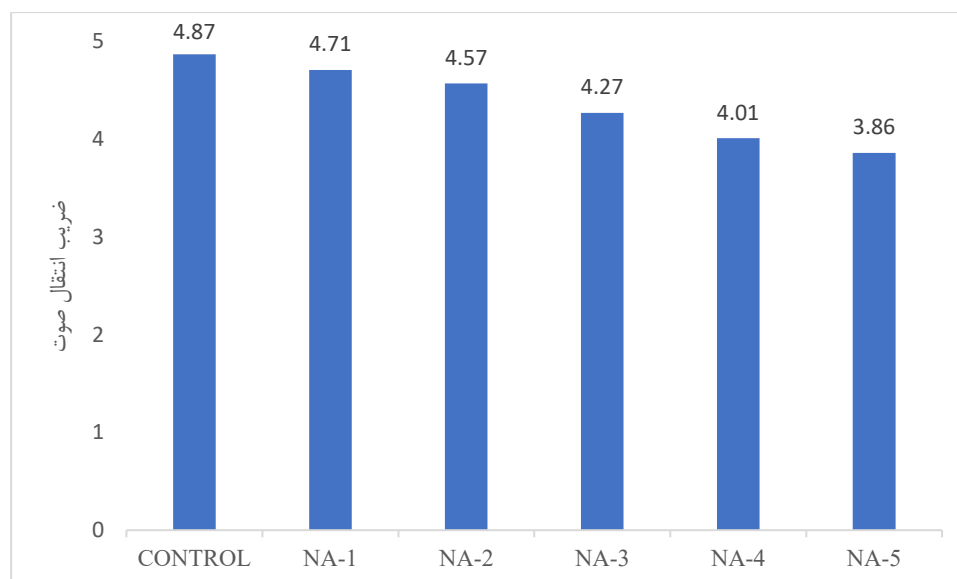
در فرکانس ۸۰ هرتز، طرح کنترل با آفت انتقال ۲/۲۱ دسی‌بل دارای حداقل عملکرد و طرح NA-5 با ۲/۸۴ دسی‌بل دارای بهترین عملکرد می‌باشد. این تفاوت نشان‌دهنده حدود ۲۲٪ بهبود در عملکرد طرح NA-5 نسبت به کنترل است. در فرکانس ۱۰۰ هرتز، تفاوت‌ها کمابیش مشابه است. بطوریکه طرح کنترل همچنان با ۲/۱۵ دسی‌بل کمترین و طرح NA-5 با ۲/۶۵ دسی‌بل بیشترین آفت انتقال را دارد. در فرکانس ۱۶۰ هرتز، طرح کنترل با طرح‌های NA-1 و NA-2 تقریباً عملکرد مشابهی با آفت حدود ۲/۷۳ و ۲/۹۱ دسی‌بل دارند، در حالیکه طرح NA-5 با ۳/۱۷ دسی‌بل عملکرد بهتری نشان می‌دهد و معادل حدود ۱۶٪ بهبود نسبت به طرح کنترل را نشان می‌دهد. با افزایش فرکانس به ۳۱۵ هرتز، طرح NA-4 و NA-5 عملکرد مشابهی دارند و هر دو حدود ۴/۹۵ دسی‌بل آفت انتقال نشان می‌دهند در حالیکه کنترل با ۴/۷ دسی‌بل همچنان کمترین میزان دفع صدا را دارد. در فرکانس ۶۳۰ هرتز، طرح NA-5 با ۹/۶۵ دسی‌بل به عنوان

بهترین عملکرد و ۷٪ بهبود نسبت به طرح کنترل که ۹/۰۶ دسی بل است، نشان می‌دهد. در فرکانس‌های بسیار بالا مانند ۱۰۰۰ هرتز، تمامی نمونه‌ها به عملکرد بهینه نزدیک می‌شوند. طرح NA-5 با ۱۱/۶۶ دسی بل همچنان در صدر است و طرح کنترل با ۱۱/۲۷ دسی بل کمترین میزان افت را دارد. تفاوت درصدی در این فرکانس تنها حدود ۳٪ است که نشان‌دهنده کاهش تفاوت عملکرد در فرکانس‌های بالا می‌باشد. در نهایت، در فرکانس ۱۶۰۰ هرتز، طرح NA-5 با ۱۱/۳۸ دسی بل و طرح کنترل با ۱۱/۰۷ دسی بل مقادیر نزدیک به هم دارند. این نتایج نشان می‌دهد که با افزایش فرکانس، تاثیر ساختاری و مواد تشکیل‌دهنده بتن در دفع صدا کاهش می‌یابد و عملکرد نمونه‌ها به یکدیگر نزدیک می‌شود. در مجموع، NA-5 در اکثر فرکانس‌ها بهترین عملکرد را داشته و می‌تواند گزینه مناسبی برای کاربری‌هایی باشد که نیاز به کاهش انتقال صدا دارند. تفاوت‌ها به ویژه در فرکانس‌های پایین‌تر بیشترین است که باید در طراحی مصالح صوتی به این موضوع توجه شود.

در نهایت میزان ضریب انتقال صوت طرح کنترل و NA-1, 2, 3, 4, 5 به ترتیب برابر با ۴/۸۷، ۴/۷۱، ۴/۵۷، ۴/۲۷ و ۴/۰۱ و ۳/۸۶ بدست آمد. لازم به ذکر است که هر چه میزان ضریب انتقال صوت جسم پایین‌تر باشد، صوت توانایی کمتری برای عبور خواهد داشت. شکل شماره ۱۸ میزان ضریب انتقال صوت نمونه‌ها را با یکدیگر مقایسه می‌کند.



شکل ۱۷ ضریب کاهش انتقال صوت در فرکانس‌های مختلف

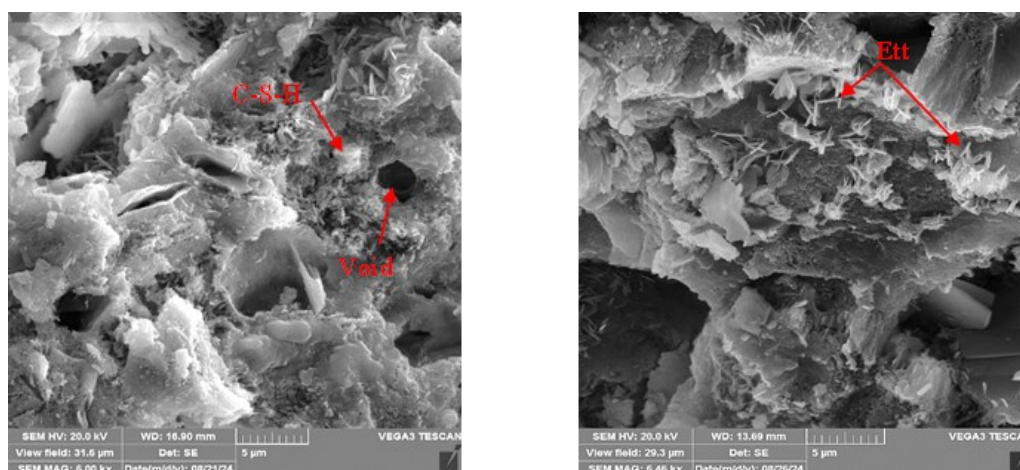


شکل ۱۸ میانگین ضریب انتقال صوت طرح‌های مختلف

نتایج آزمایش آکوستیک صوت نشان داد که هر نمونه در محدوده فرکانسی خاص، ویژگی‌های انتقال صوت متفاوتی از خود نشان می‌دهد، ولی به طور کلی NA-5 بهترین عملکرد را دارد. ابتدا، در فرکانس‌های پایین (۸۰ تا ۱۶۰ هرتز)، نمونه NA-5 بالاترین میزان افت انتقال صوت را نسبت به سایر نمونه‌ها نشان داد. این نشان می‌دهد که این نمونه به خوبی قادر به کاهش انتقال صوت در این فرکانس‌ها است. برعکس NA-1 کمترین میزان افت انتقال صوت را داشت، که می‌تواند بیانگر جذب کمتر صدا و عبور بیشتر آن باشد. در فرکانس‌های میانی (۲۵۰ تا ۶۳۰ هرتز)، مجدداً NA-5 عملکرد بالایی نشان داد. به طور خاص، در فرکانس ۵۰۰ هرتز، این نمونه بالاترین افت انتقال صوت را داشت و تفاوت عملکرد آن با نمونه‌های دیگر برجسته‌تر شد. این امر می‌تواند نشان‌دهنده توانمندی‌های NA-5 در کاربردهایی باشد که کاهش صدا در این محدوده فرکانسی اهمیت دارد. در فرکانس‌های بالا (۸۰۰ تا ۱۶۰۰ هرتز)، نمونه NA-5 همچنان پیش‌تاز بود. در فرکانس ۱۲۵۰ و ۱۶۰۰ هرتز، عملکرد این نمونه نسبت به سایرین برتری داشت. در کل، NA-5 به عنوان بهترین گزینه برای کاهش انتقال صوت در تمامی محدوده‌های فرکانسی مورد بررسی شناخته شد.

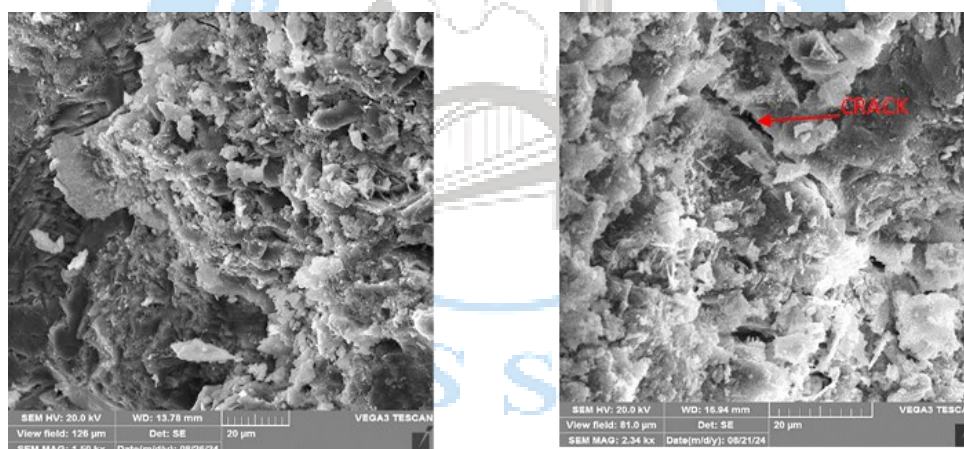
۵-۶- ریز ساختار الکترونی روبشی

شکل شماره ۱۹ ساختار بتن حاوی نانو آنتیموان را با بزرگنمایی $5\mu\text{m}$ نشان می‌دهد. این تصاویر ماده‌ای ناهمگن را نشان می‌دهند که مشخصه سیمان هیدراته است. وجود ژل هیدروکسید کلسیم (C-S-H)، اترینگایت سیمان (Ett) و مواد مینرال سیمانی که در اثر فرآیند هیدراتاسیون سیمان بوجود آمده است را نشان می‌دهد. مواد مینرال سیمان به‌طور کلی شامل آهک، سیلیس، آلومینا، آهن، منیزیا، و سولفات‌ها هستند که هر یک به‌نحو خاص در واکنش‌های شیمیایی سیمان و تعیین ویژگی‌های نهایی آن نقش دارند. در این تصاویر که مربوط به دو کانون هدف مختلف از سطح بتن است به خوبی اترینگایت سیمانی مشهود است که نشان از واکنش صحیح هیدراتاسیونی سیمان می‌باشد. بنابراین افزودن نانو دی اکسید آنتیموان اثر مضر بر روی واکنش هیدراتاسیون سیمان نخواهد داشت.



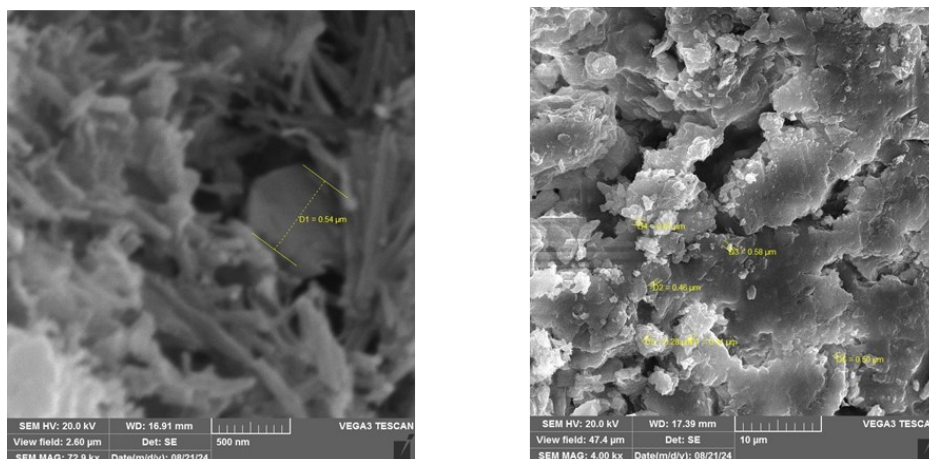
شکل ۱۹ ساختار بتن حاوی نانو آنتیموان را با بزرگنمایی ۵μm

شکل شماره ۲۰ ساختار بتن حاوی نانو آنتیموان را با بزرگنمایی ۲۰μm نشان می‌دهد. در این تصاویر که مربوط به دو کانون مختلف از سطح بتن است به خوبی توزیع ذرات نانو آنتیموان در کنار محصولات هیدراتاسیون سیمان مانند اترینگایت (EtT) و ژل هیدروکسید کلسیم (C-S-H) را نشان می‌دهد. محصولات هیدراته به طور همگن توزیع نشده‌اند و مناطقی با مقدار بیشتر محصولات هیدراتاسیون وجود دارد. همچنین ممکن است ذرات نانو آنتیموان تشکیل کلوخه (LUMPY) داده باشند که بطور واضح در این تصویر مشخص نمی‌باشد.

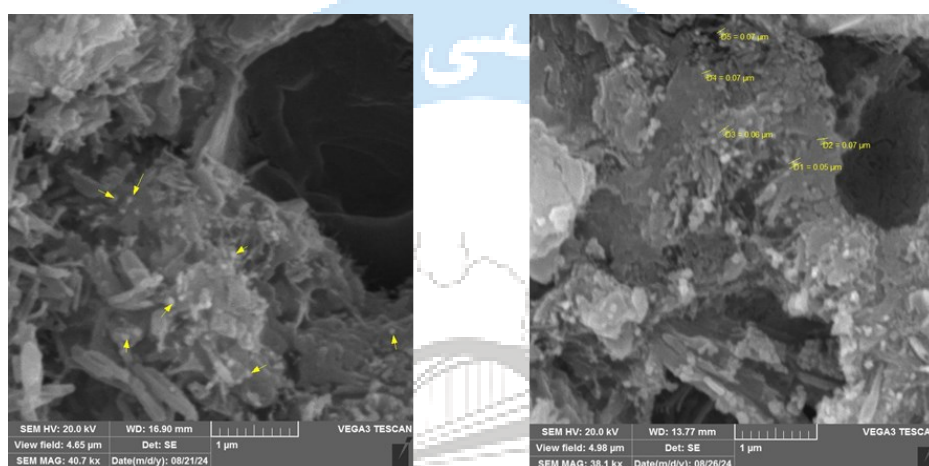


شکل ۲۰ ساختار بتن حاوی نانو آنتیموان را با بزرگنمایی ۲۰μm

شکل شماره ۲۱ و ۲۲ توزیع ذرات نانو آنتیموان را در سطح بتن نشان می‌دهد. نانوذرات می‌توانند به طور بالقوه توزیع اندازه منافذ را تغییر دهند و تخلخل کلی و اندازه منافذ بتن را کاهش دهند.



شکل ۲۱ توزیع ذرات نانو آنتیموان را در سطح بتن



شکل ۲۲ نمایش ذرات نانو آنتیموان در ساختار بتن

۷- نتیجه گیری

- برخی از مهم‌ترین نتایج بدست آمده در این تحقیق به شرح زیر می‌باشند:
- ۱- اسلامپ بتن با افزایش درصد نانو آنتیموان کاهش محسوسی داشت. به‌طوری‌که در طرح NA-5 میزان اسلامپ ۵/۵ سانتیمتر بود که نسبت به نمونه کنترل ۶۸٪ کاهش نشان داد.
- ۲- استفاده از میزان بهینه نان آنتیموان، با تسریع فرآیند هیدراتاسیون سیمان و بهبود پیوند بین خمیر سیمان و سنگدانه‌ها، ساختاری متراکم‌تر ایجاد کرده و منجر به افزایش مقاومت فشاری به‌ویژه در سنین اولیه می‌شود.
- ۳- مقاومت فشاری ۷ روزه در طرح NA-2 حدود ۱۳٪ بالاتر از نمونه CONTROL بود که نشان‌دهنده اثر آن در افزایش مقاومت اولیه است.
- ۴- مقاومت فشاری ۹۰ روزه طرح NA-2 نسبت به نمونه CONTROL حدود ۲۲٪ افزایش یافت.
- ۵- نتایج آزمایش آکوستیک صوت نشان داد که هر نمونه در محدوده فرکانسی خاص، ویژگی‌های انتقال صوت متفاوتی از خود نشان می‌دهد، ولی به طور کلی NA-5 بهترین عملکرد را دارد.
- ۶- در فرکانس‌های پایین و متوسط (۸۰ تا ۶۳۰ هرتز)، نمونه NA-5 بالاترین میزان آفت انتقال صوت را نسبت به سایر نمونه‌ها نشان می‌دهد. این نشان می‌دهد که این نمونه به خوبی قادر به کاهش انتقال صوت در این فرکانس‌ها است.

- ۷- در فرکانس‌های بالا (۱۲۵۰ و ۱۶۰۰ هرتز)، نمونه NA-5 به ترتیب با آفت انتقال صوت ۱۰/۸ و ۱۱/۰ دسی‌بل، نسبت به کنترل حدود ۱۱٪ بهبود عملکرد آکوستیکی داشت.
- ۸- نتایج نشان داد به دلیل عدم بهبود چسبندگی و کیفیت ناحیه انتقالی بین خمیر سیمان و سنگدانه، تغییر معناداری در مقاومت‌های کششی و خمشی ایجاد نمی‌شود.

منابع

- [1] Nosrati, K., Khodadadi Dorban, A., and Abdollahi, M. (2015). Adsorption of antimony from Zarshouran gold factory wastewater using zero-valent iron nanoparticles coated on bentonite. *Journal of Water and Wastewater*, 26(1), 46–56.
- [2] Farhamandzad, S., and Dashti, H. (2023). Nano materials and their application in concrete. *Modern Research in Engineering Sciences*, 48(8), 9–16.
- [3] Farkhzad, K., Divan Dari, M., and Jasini, M. (2021). Comparison of the effect of nano calcium carbonate and nano silica on the properties of self-compacting concrete. *Structural and Construction Engineering*, 7(4), 187–201.
- [4] Sedaghat, A., Anoushiravan, G., and Kambiz, K. (2016). The role of nanotechnology in construction and concrete technology. *Applied Research in Engineering and Technical Sciences*, 1(1), 79–90.
- [5] Foroughi Asl, H., Houshyar, F., and Sina, F. (2022). The effect of nano zinc oxide on the mechanical properties of self-compacting concrete. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, Tabriz University.
- [6] Hashemi, S. Sh., Ganjali, A., Mirzakhani, M., and Irani, S. (2023). Investigation of the effect of slag, nano magnesium oxide, and nano copper oxide on the properties of ultra-high-performance concrete under different curing conditions using electrical resistance monitoring method. *Concrete Research*, 16(3), 81–92.
- [7] Kapicová, A., Bílý, P., Fládr, J., Šeps, K., Chylik, R., and Trtík, T. (2024). Development of sound-absorbing pervious concrete for interior applications. *Journal of Building Engineering*, 85, 108697. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.108697>
- [8] Zhang, Y., Li, H., Abdelhady, A., and Du, H. (2022). Laboratorial investigation on sound absorption property of porous concrete with different mixtures. *Construction and Building Materials*, 259, 120414. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120414>
- [9] Lin, S., Zhang, G., Sun, J., He, S., Chen, C., Morsy, A. M., and Wang, X. (2021). Acoustic performance optimization of a cementitious composite with a porous medium. *Journal of Building Engineering*, 44, 103362.
- [10] Stolz, J., Boluk, Y., and Bindiganavile, V. (2018). Mechanical, thermal and acoustic properties of cellular alkali activated fly ash concrete. *Cement and Concrete Composites*, 94, 24–32.
- [11] Polder, R., Peelen, W., and Courage, W. (2018). Non-traditional assessment and maintenance methods for aging concrete structures: Technical and non-technical issues. *Materials and Corrosion*, 69(9), 1147–1153.
- [12] Chelanganar Navid, N., and Jabbari Mohammad Mahdi, M. (2018). The effect of using a combination of nano silica and metakaolin in concrete containing recycled fine rubber aggregate on mechanical properties of concrete.
- [13] Ismaili, J., Andalibi, K., and Kasaei, J. (2018). Investigation of the effects of adding nano-alumina on the mechanical properties of concrete. In *Proceedings of the 10th International Congress of Civil Engineering*, Faculty of Civil Engineering, Tabriz, 15–30.
- [14] Naderi, M., and Kaboudan, A. (2017). The effect of resistance, time, and amount of water pressure and direction of concreting on concrete permeability. *Amirkabir Civil Engineering Journal*, 1–19.
- [15] Ghorbani Ali, A., Ghorbani Amin, A., and Shokati Gourabi Fatemeh, F. (2019). Comparison of tests related to fresh self-compacting concrete containing nanoparticles.
- [16] Alizadeh Laski, R., and Ramazan, R. (2019). Comparison of tests related to fresh self-compacting concrete containing nanoparticles. *Omidran va Projeh Journal*, 1(3), 57–67.
- [17] Shokouhfar, A., Salehi, A., and Vadoudi, M. (2020). The effect of different percentages of nano silica and steel fibers on the impact resistance of concrete. *Essas Scientific-Research Quarterly*, 22(58), 73–85.
- [18] Kohsari, B., Bagheri, S., and Sasan, K. (2024). Mineralogy and origin of antimony mineralization in Sefidabeh and Hyderabad mines, Sistan fusion zone. *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy*, 32(3), 509–524.
- [19] Madandoust, R., and Deylami Poshtjoeei, S. (2021). A study on the compressive strength, static and dynamic elastic modulus of self-compacting concrete containing nano materials.
- [20] Zarei, H., Shahriari, P., Parhoodeh, A., and Karbakhsh, M. (2020). Study and analysis of the effects of nano-concrete in sustainable urban spaces (Case Study: Shiraz metropolis). *Scientific & Research Quarterly of Urban Research and Planning*, 10(39), 75–88.
- [21] Silvestre, J., Silvestre, N., and De Brito, J. (2016). Review on concrete nanotechnology. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 20(4), 455–485.
- [22] Norhasri, M. M., Hamidah, M. S., and Fadzil, A. M. (2017). Applications of using nano material in concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 133, 91–97.

- [23] Amin, M., and Abu el-Hassan, K. (2015). Effect of using different types of nano materials on mechanical properties of high strength concrete. *Construction and Building Materials*, 80, 116–124.
- [24] Abhilash, P. P., Nayak, D. K., Sangoju, B., Kumar, R., and Kumar, V. (2021). Effect of nano-silica in concrete; a review. *Construction and Building Materials*, 278, 122347.
- [25] Said, A. M., Zeidan, M. S., Bassuoni, M. T., and Tian, Y. (2012). Properties of concrete incorporating nano-silica. *Construction and Building Materials*, 36, 838–844.
- [26] Zhuang, C., and Chen, Y. (2019). The effect of nano-SiO₂ on concrete properties: a review. *Nanotechnology Reviews*, 8(1), 562–572.
- [27] Mohamed, A. M. (2016). Influence of nano materials on flexural behavior and compressive strength of concrete. *HBRC Journal*, 12(2), 212–225.
- [28] Du, H., Du, S., and Liu, X. (2014). Durability performances of concrete with nano-silica. *Construction and Building Materials*, 73, 705–712.
- [29] Chuah, S., Pan, Z., Sanjayan, J. G., Wang, C. M., and Duan, W. H. (2014). Nano reinforced cement and concrete composites and new perspective from graphene oxide. *Construction and Building Materials*, 73, 113–124.
- [30] Singh, N. B., Kalra, M., and Saxena, S. K. (2017). Nanoscience of cement and concrete. *Materials Today: Proceedings*, 4(4), 5478–5487.
- [31] Salemi, N., and Behfarnia, K. (2013). Effect of nano-particles on durability of fiber-reinforced concrete pavement. *Construction and Building Materials*, 48, 934–941.
- [32] Farzin Ghadim Takmeh Dash, A. M., and Afshin, H. (2021). Investigation of some durability properties of concrete pavements containing nanoparticles. *Journal of Amirkabir Civil Engineering*, 1–10.
- [33] Maarefvand, A., Arefian, A., and Alipour, P. (2018). Investigation of seismic behavior of continuous connection of steel beam to concrete column using nanotechnology in materials (Master's thesis). Islamic Azad University, Shahriar Branch, 24–39.
- [34] Chakherloo, J., and Shervani, B. (2019). Investigation of the effect of replacing silica sand with sand and quartz powder on the compressive strength of reactive powder concrete. *Scientific-Research Journal, Modares Civil Engineering*, 1–11.
- [35] Sargunan, K., Venkata Rao, V., and Alex Rajesh, C. (2022). Experimental investigations on mechanical strength of concrete using nano-alumina and nano-clay. In *International Conference on Emerging Trends in Material Science and Technology*, 143–160.
- [36] Lashgarit, H., Hosseinpour, M., Parvizi, S., and Momeni, A. (2017). Investigation of the effective parameters on Al₆₀61/Al₂O₃.Wc.Sic composite by friction stir process. In *Second National Conference On Computational And Experimental Mechanics*, 10–18.
- [37] Naderi, M., Kaboudan, A., and Keshtkar, M. (2016). Study of permeability and strength of concrete containing silica fume, zeolite, and fly ash using British standard cylindrical chamber method. *Journal of Structural Engineering*, 92–113.
- [38] Behfarnia, K., and Salemi, N. (2013). The effects of nano-silica and nano-alumina on frost resistance of normal concrete. *Construction and Building Materials*, 48, 580–584.
- [39] Muzenski, S., Flores-Vivian, I., and Sobolev, K. (2019). Ultra-high strength cement-based composites designed with aluminum oxide nano-fibers. *Construction and Building Materials*, 220, 177–186.
- [40] Kalvandi, M., Rezaei, M., and Kalvandi, M. (2015). The effect of iron nanoparticles, iron oxide, titanium and silica particles on the properties and durability of concrete. In *2nd National Congress of Civil Engineering and Construction Projects*, 20–31.
- [41] Pillai, R., Gettu, R., Santhanam, M., Rengaraju, S., Dhandapani, Y., Rathnarajan, S., and Basavaraj, A. S. (2019). Service life and life cycle assessment of reinforced concrete systems with limestone calcined clay cement (LC3). *Cement and Concrete Research*, 111–119.
- [42] Pachideh G, Gholhaki M, Ketabdari H. Effect of pozzolanic wastes on mechanical properties, durability and microstructure of the cementitious mortars. *J Building Eng*. 2020;29:101178.
- [43] Pachideh G, Toufigh V. A study on the cementitious mortars containing multi-walled carbon nanotubes and nanographene. *J Testing Eval*. 2023;51(2):398-415.
- [44] Pachideh G, Gholhaki M. Using steel and polypropylene fibres to improve the performance of concrete sleepers. *Proc Inst Civ Eng Struct Build*. 2020;173(9):690-702.
- [45] Pachideh G, Gholhaki M, Rezaifar O. Experimental study on engineering properties and microstructure of expansive soils treated by lime containing silica nanoparticles under various temperatures. *Geotech Geol Eng*. 2021;39(6):4157-68.