

بررسی تأثیر نانو ذرات سیلیس بر مقاومت و مکانیزم شکست مواد پایه سیمانی با استفاده از سیستم انتشار آوایی

امین ناظری^۱؛ حمیدرضا نجاتی^{۲*}؛ عبدالهادی قزوینیان^۳

- ۱- کارشناس ارشد مکانیک سنگ، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس
۲- استادیار، گروه مکانیک سنگ، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، h.nejati@modares.ac.ir
۳- دانشیار، گروه مکانیک سنگ، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

(دریافت ۱۳ بهمن ۱۳۹۳، پذیرش ۲۲ تیر ۱۳۹۵)

چکیده

شکست بسیاری از سازه‌های مهندسی بر اثر گسترش ترک با وجود پایین بودن نرخ بارگذاری روی آن‌ها در مقایسه با مقاومت تئوریک سازه‌ها، لزوم درک دقیق مکانیزم و عوامل موثر بر گسترش ترک را آشکار می‌سازد. استفاده از روش‌های متداول تحلیل و طراحی سازه‌های فولادی، بتنی و سنگی بر مبنای معیارهای تنش و مقاومت، تاکنون مشکلات زیادی در پایداری سازه‌ها به وجود آورده است. امروزه با توجه به گستردگی روز افزون نانو بتن‌ها، مطالعات تأثیر نانو ذرات بر مکانیزم شکست در این نوع بتن‌ها بسیار نادر است. در این تحقیق مکانیزم داخلی مقاومت و شکست بتن‌های مسلح شده با نانو ذرات سیلیسی مطالعه و بررسی شده است. برای تحقق این موضوع از نمونه‌های مختلف استوانه‌ای، دیسکی با ترک مرکزی (CSCBD) و مکعب مربع طبق استاندارد و ترکیب‌های یکسان (آب، سیمان و سنگ‌دانه) اما متفاوت در مقدار نانو ذرات سیلیس (۰، ۰/۵، ۱، ۱/۵) در بازه‌های مختلف نگهداری ۷ و ۲۸ روز استفاده شده است. برای رفتارنگاری فرآیند شکست نیز از تکنیک نوین انتشار آوایی (AE) استفاده شده است که با بررسی پارامترهایی نظیر تعداد کانت، گسترش ترک پایدار و ناپایدار، فرکانس متوسط و زاویه خیز نیز مشاهده می‌شود که با تغییرات مقدار درصد نانو ذرات سیلیس در خمیره بتن، این پارامترها نیز تغییر می‌کنند. می‌توان اینگونه بیان کرد که نتایج بیان‌گر رابطه خطی بین مقاومت و چقرمگی شکست مد برش و کشش نمونه‌ها بوده است، به طوری که بتن‌های با ۱ درصد از نانو ذرات سیلیس بیشترین چقرمگی شکست را دارند و با افزایش و یا کاهش مقدار نانو ذرات سیلیس، مقاومت و چقرمگی شکست در هر دو مد شکست کاهش می‌یابد. همچنین نمونه‌های نانو بتن تحمل تنش‌های بالاتر بدون گسترش ترک ناپایدار را نسبت به بتن معمولی دارند و یا به عبارت بهتر نانو ذرات سیلیس باعث تاخیر در گسترش ترک ناپایدار در ساختار نمونه‌ها می‌شود.

کلمات کلیدی

چقرمگی شکست، گسترش ترک، نانو ذرات سیلیس، انتشار آوایی

۱- مقدمه

مکانیک مواد و استانداردهای این علم برای تعیین داده‌های متناظر با داده‌های کمی به‌دست آمده است [۱۰]. امروزه با توجه به این‌که بتن‌های با عملکرد بالا بهبود یافته و در صنعت ساخت و ساز بسیار استفاده شده است، استفاده از مکانیک شکست الاستیک خطی بسیار کاربردی شده است. تجزیه و تحلیل تنش تنها نیمی از محاسبات است. برای بررسی مقاومت شکست مواد باید این تجزیه و تحلیل‌ها با محدودیت‌های موجود در مواد مورد مقایسه و بررسی قرار داده شود. در مکانیک شکست الاستیک خطی این محدودیت با نام فاکتور شدت تنش یا چقرمگی شکست (K_{IC}) معرفی می‌شود. تا به امروز چقرمگی شکست با روش‌های عددی محاسبه نشده است و بنابراین این فاکتور با توجه به آزمون‌های آزمایشگاهی باید محاسبه شود. تست‌های استاندارد مختلفی برای چقرمگی شکست بتن از سال ۱۹۸۵ تا به امروز مورد استفاده قرار گرفته است. اغلب این روش‌ها نیاز به نمونه‌های با هندسه بزرگ و مستطیلی شکل دارند. با توجه به این تفاسیر برای محاسبه چقرمگی شکست در سازه‌های موجود استفاده از سیستم مغزه‌گیری و آماده‌سازی نمونه‌های دیسکی به مراتب آسان‌تر و مناسب‌تر است.

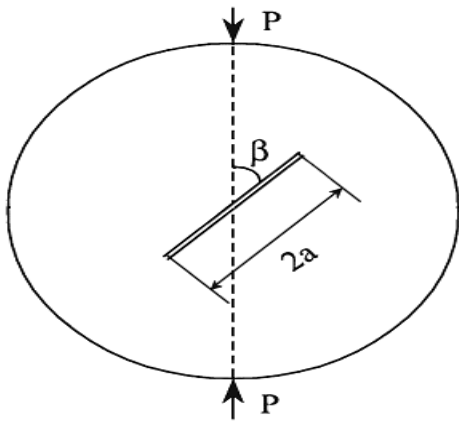
با توجه به تمامی مطالب عنوان شده، در این تحقیق بررسی مکانیزم داخلی مقاومت و شکست بتن‌های مسلح شده با نانو ذرات سیلیس مطالعه و بررسی شده است تا بتوان به درک بهتری از بعد رفتار مکانیکی این نوع بتن‌ها دست یافت و همچنین برای تعیین چقرمگی نمونه‌ها از روش دیسک برزیلی با ترک مستقیم مرکزی (CSCBD)^۱ استفاده شده است که یکی از روش‌های پیشنهادی توسط انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ^۲ است.

۲- تکنیک انتشار آوایی (AE)

استفاده از روش تست‌های غیر مخرب برای بررسی و به‌دست آوردن اطلاعات کمی و کاربردی در مطالعه مکانیک شکست مواد در حال توسعه است. شکست در مواد با آزاد-

مکانیزم شکست مواد ترد اهمیت زیادی بر عملکرد سازه‌ها دارد. شکست‌های سریع و ناگهانی سازه‌های معدنی و عمرانی بزرگ مقیاس باعث کاهش ایمنی سازه، تخریب مواد و حتی باعث توقف فعالیت‌های معدنی و عمرانی می‌شود. توانایی در شناسایی رفتار قبل از شکست مواد باعث پیش‌بینی و یا دفع شکست‌های احتمالی می‌شود [۱]. سیمان با توجه به مقاومت بالا و اقتصادی بودن خود در جوامع امروزی به‌عنوان یکی از عمده مواد مصرفی به‌طور فراگیر در حال استفاده می‌باشد که برای بالا بردن کارایی و استفاده بهینه از آن بسیاری از پژوهش‌های حال حاضر را به خود اختصاص داده است [۳،۲]. خلل و فرج‌های موجود در خمیره بتن که شامل منافذ سیمان، ترک‌های موجود در خمیره، فضاهای اتصال سنگ دانه‌ها و خمیره، همچنین ترک‌های به وجود آمده در پی از دست دادن آب بتن می‌باشند، تأثیر چشم‌گیری در رفتار مکانیکی بتن دارند. وجود این نقایص نقش بسیار مهمی را ایفا می‌کند که باعث افزایش زون میکرو ترک‌ها در پیشبرد ماکرو ترک‌ها و پیشرفت شکست کلی سازه در نتیجه رشد ترک می‌شود [۵،۴]. در سال‌های اخیر مطالعات بر روی نانو ذرات سیلیس متمرکز شده است، با این هدف که بتوان با استفاده از این ماده، مشخصات مواد پایه سیمانی نظیر بتن را بیش از پیش افزایش داد. افزودن نانو سیلیس به بتن موجب افزایش مقاومت فشاری، کششی و خمشی، کاهش زمان گیرش و کاهش نفوذ پذیری آب درون بتن و همچنین مقاومت بالاتر در برابر حمله‌های شیمیایی می‌شود [۹-۶]. نتایج اساسی منتشر شده در این مسئله مربوط به پژوهشگران علم شیمی، فیزیک و مواد است، به‌طوری که تنها رفتار مکانیکی ظاهری خارجی آن‌ها بررسی شده و مکانیزم داخلی این نوع مواد هنوز مطالعه نشده است. در بسیاری از مطالعات انجام شده ویژگی‌های کمی از نانو مواد به‌صورت تئوری و آزمایشی بررسی شده است. قدم بعدی مرتبط کردن این داده‌های کمی با نگرش و مفهوم

دیسک برزیلی با ترک مستقیم مرکزی (CSCBD)، روشی پیشنهادی از سوی انجمن جهانی مکانیک سنگ برای تعیین چقرمگی شکست در آزمایشگاه است. از مزایای این روش می‌توان به محاسبه چقرمگی مد کشش خالص (K_I) و برش خالص (K_{II}) با توجه به زاویه ترک با امتداد بارگذاری اشاره کرد. شکل ۲ نمونه دیسک برزیلی با ترک مستقیم مرکزی تحت بارگذاری با زاویه β را نشان می‌دهد.



شکل ۲: تصویری شماتیک از نمونه دیسک برزیلی با ترک مستقیم مرکزی [۱۴]

آتکینز^۴ و همکاران یک بیان تحلیلی برای محاسبه چقرمگی مد برشی و کششی با استفاده از نمونه‌های برزیلی با ترک مرکزی به صورت زیر ارائه کرده‌اند [۱۴]:

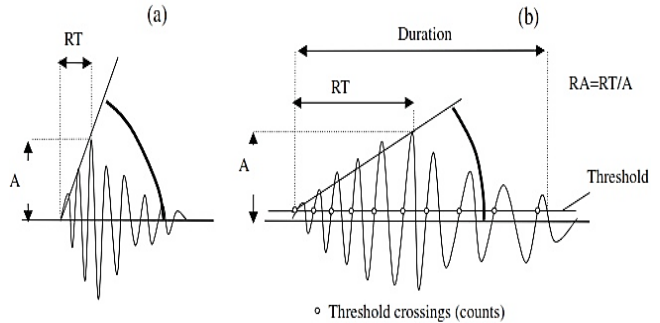
$$K_I = \frac{P\sqrt{a}}{\sqrt{\pi RB}} N_I \quad (1)$$

$$K_{II} = \frac{P\sqrt{a}}{\sqrt{\pi RB}} N_{II} \quad (2)$$

که در آن K_I و K_{II} فاکتور شدت تنش مد شکست کششی و برشی (متر. پاسکال)^{0.5}، P بار فشاری در لحظه شکست (نیوتن)، a نصف طول ترک مرکزی (متر)، R شعاع نمونه برزیلی (متر)، B ضخامت نمونه‌های برزیلی (متر) و N_I و N_{II} ضرایب بدون بعد هندسی که تابعی از نسبت نصف طول ترک روی شعاع نمونه ها ($\frac{a}{R}$) و زاویه امتداد ترک (β) با امتداد بارگذاری است. محاسبه مقادیر N_I و N_{II} به عنوان تابعی از $\frac{a}{R}$

سازی انرژی کرنشی همراه است که این انرژی توسط ایجاد سطوح جدید (ترک) و یا حرکت اصطکاکی بین سطوح ترک‌های موجود مصرف می‌شود و در پی آن ساطع شدن امواج الاستیک می‌باشد که به صورت امواج AE تعریف شده است. امواج یاد شده در داخل ماده پخش و توسط سنسورهایی که به صورت مستقیم به سطح خارجی جسم متصل می‌باشند، ضبط و ثبت می‌شوند. هدف نهایی در شناسایی با سیستم انتشار آوایی^۳ کسب اطلاعات مفید و کاربردی در جلوگیری از شکست‌های فاجعه‌آمیز با ایجاد رابطه‌ای منطقی بین پارامترهای به دست آمده در حین پیشرفت و گسترش شکست در ساختار است. سیگنال‌های ثبت شده در انتشار آوایی با توجه به پدیده شکست تولید شده است و بنابراین مطالعه خصوصیات پارامترهای موجود در انتشار آوایی بسیار ضرورت دارد [۱۲، ۱۱].

نوع شکل امواج AE برای بررسی ویژگی از مدهای شکست طبق شکل ۱ گزارش شده است.



شکل ۱: نوع امواج برای دو مد شکست (a) کششی و (b) برشی [۱۰]

شکست برشی با زمان خیز طولانی و اغلب با دامنه بیشتر نسبت به شکست کششی مشخص می‌شود. به طوری که نوع شکست کششی زاویه خیز کمتری را نشان می‌دهد. پارامتر فرکانس متوسط نیز از مقدار زیاد به مقدار کم در تغییر رفتار شکست از حالت کششی به برشی، نزول پیدا می‌کند [۱۳].

۲- روش تعیین چقرمگی شکست

۴-۱- مواد اولیه و طرح اختلاط

مواد اولیه تشکیل‌دهنده نمونه‌های بتنی متشکل شده است از، سیمان پرتلند تیپ ۲ به‌عنوان ماده اصلی چسباننده (تهیه شده در کارخانه سیمان فیروز کوه)، نانو ذرات سیلیس که مشخصات عمومی از نانو ذرات سیلیس استفاده شده در نمونه‌ها در جدول ۱ ارائه شده است و همچنین سنگ دانه‌ها به دو نوع سنگ دانه با توجه به استاندارد ساخت هر کدام از نمونه‌ها به‌صورت گرد گوشه و تیز گوشه (شکسته) استفاده شده است. اندازه سنگ دانه‌های استفاده شده برای گرد گوشه کمتر از ۰/۵ میلی‌متر و برای تیز گوشه حداکثر ۱۲/۵ میلی‌متر بوده است.

جدول ۱: مشخصات فیزیکی نانو ذرات سیلیس

قطر (nm)	مساحت سطح ویژه (m ² /g)	چگالی (g/cm ³)	خلوص (%)
۱۵±۳	۶۴۰±۱۲	<۰/۱۴	>۹۹/۹

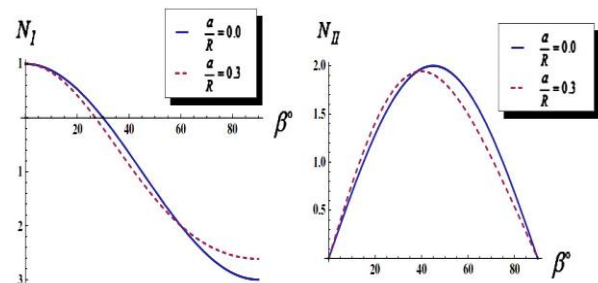
در مجموع دو نوع کلی نمونه شامل بتن‌های معمولی و بتن‌های همراه با نانو ذرات سیلیس در آزمایشگاه ساخته شد. سری بتن‌های معمولی از ترکیب معمولی سیمان، آب و سنگ‌دانه ساخته شد و برای سری بتن‌های دیگر از نانو ذرات سیلیس با میانگین قطر ۱۵ نانو متر در سه درصد وزنی مختلف از سیمان ۰/۵، ۱ و ۱/۵ استفاده شده است. نمونه‌های بتنی در مخزن آب معمولی در دمای اتاق برای دوره زمان‌های ۷ و ۲۸ روز نگهداری (شکل ۴) و آزمایش شده است. نسبت اختلاط نمونه‌های مورد آزمایش طبق جدول ۲ ارائه شده است.

و β بسیار مشکل است [۱۴]. آتکینسون^۵ در سال ۱۹۸۲ روابط ۳ و ۴ را برای نمونه‌هایی با طول ترک نسبتاً کوچک پیشنهاد کرده است [۱۵]. $(\frac{a}{R} \leq 0.3)$:

$$N_I = 1 - 4(\sin \beta)^2 + 4(\sin \beta)^2 (1 - 4(\cos \beta)^2) \left(\frac{a}{R}\right)^2 \quad (3)$$

$$N_{II} = [2 + (8(\cos \beta)^2 - 5) \left(\frac{a}{R}\right)^2] \sin 2\beta \quad (4)$$

بر اساس مقادیر مختلفی از نسبت $(\frac{a}{R})$ ، تغییرات مقادیر N_I و N_{II} با تغییرات زاویه β در شکل ۳ نمایش داده شده است [۱۴].

شکل ۳: تغییرات N_I و N_{II} با زاویه β و $\frac{a}{R}$ [۱۴]

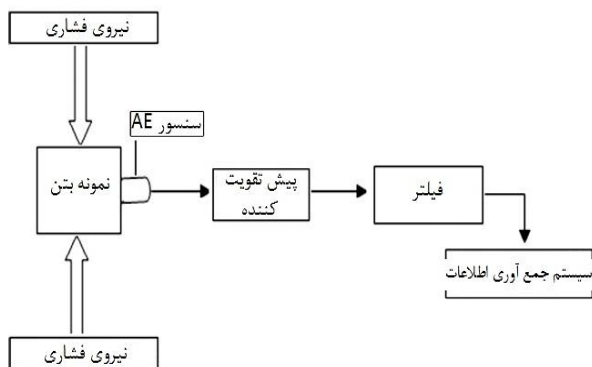
همان‌گونه که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، فاکتور بدون بعد شدت تنش مد I شکست به‌طور یکنواخت با افزایش زاویه β کاهش می‌یابد. این در حالی است که N_{II} یک بیشینه موضعی در 40° تا 45° دارد. بعلاوه شکل ۳ تاکید می‌کند که مد کشش خالص در حالت $\beta = 0$ اتفاق می‌افتد. در حالی که مد Π خالص در حالت بارگذاری با زاویه 40° تا 45° بر اساس مقادیر مختلف $\frac{a}{R}$ اتفاق می‌افتد. با توجه به این که نسبت $\frac{a}{R}$ برای نمونه‌های آزمایش شده در این تحقیق برابر ۰/۳ می‌باشد، بنابراین بر اساس روابط ۳ و ۴ تحت زاویه بارگذاری ۲۷ درجه، نمونه‌ها تحت بارگذاری مد برش خالص با مقدار N_{II} برابر ۱/۷۳ و تحت زاویه بارگذاری صفر درجه نسبت به امتداد بارگذاری، مد کشش خالص با مقدار N_I برابر یک قرار می‌گیرد.

۴- آماده سازی و آزمایش نمونه‌ها

۴-۲-۲ آزمایش مقاومت فشاری

برای بررسی مقاومت فشاری نمونه‌ها از قالب‌های مکعب مربع با ابعاد ۵۰ میلی‌متر طبق استاندارد استفاده شده است [۱۷]. نحوه ساخت این نمونه‌ها نیز مشابه با نمونه‌های ترک‌دار مرکزی است و هر قالب به مدت دو الی سه دقیقه متراکم می‌شود. پس از گذشت ۲۴ ساعت، قالب‌ها باز شده و نمونه‌ها بیرون آورده شده و نمونه‌ها در دوره زمان‌های ۷ و ۲۸ روز درون مخزن آب نگهداری شده است. مقاومت فشاری نمونه‌ها با اعمال بار طبق استانداردهای ذکر شده برای هر سری از نمونه‌ها محاسبه و ثبت شده است.

نمای کلی از آزمایش مقاومت فشاری تک محوری مانند شکل ۵ است.



شکل ۵: نمای کلی از طرح انجام آزمایش‌ها

۵- تجزیه و تحلیل نتایج

۱-۵- مقاومت فشاری

میانگین مقاومت فشاری برای نمونه‌های مختلف از هر دو نوع بتن معمولی و همراه نانو ذرات سیلیس در جدول ۳ آورده شده است. همچنین اختلاف مقاومت نمونه بتن‌ها را در روزهای مختلف از زمان نگهداری می‌توان در شکل ۶ یافت. همان‌طور که انتظار می‌رود مقاومت بتن با گذشت زمان نگهداری افزایش یافته است. همچنین در بازه‌های مختلف از زمان نگهداری، مقاومت بتن‌های همراه با نانو ذرات سیلیس از نمونه‌های بدون نانو ذرات سیلیس (معمولی) بیشتر است. در دوره زمان نگهداری ۷ روز مقاومت نمونه‌های بتنی با افزودن نانو سیلیس با درصدهای وزنی ۰/۵، ۱ و ۱/۵ از سیمان



شکل ۴: مخزن آب نگهداری نمونه‌های بتن

جدول ۲: نسبت طرح اختلاط برای نمونه‌های بتن

نمونه	مقدار (Kg/m ³)		نانو ذرات سیلیس (درصد وزنی)
	سیمان	نانو SiO ₂	
C (کنترل)	۴۵۰	۰	۰
Nc1	۴۵۰	۲/۲۵	۰/۵
Nc2	۴۵۰	۴/۵۰	۱
Nc3	۴۵۰	۶/۷۵	۱/۵

نسبت آب به سیمان در همه ترکیبات مقدار ثابت ۰/۴ گرفته شده است.

۴-۲- روش آزمایش

۴-۲-۱- آزمایش چقرمگی شکست

برای انجام آزمایش چقرمگی شکست از نمونه‌های دیسک برزیلی با ترک مستقیم مرکزی طبق استاندارد استفاده شده است [۱۶]. برای این منظور از قالب‌های با قطر ۱۰۰ میلی‌متر و ضخامت ۵۵ میلی‌متر استفاده شده است. ترک مرکزی به طول ۳۰ میلی‌متر و ضخامت ۱ میلی‌متر در مرکز نمونه‌ها تعبیه شده است. برای از بین بردن تخلخل نمونه‌ها از تراکم به مدت دو الی سه دقیقه استفاده شده است. بعد از گیرش اولیه بتن در نهایت تیغه فولادی از درون قالب‌ها بیرون کشیده می‌شوند و ۲۴ ساعت بعد خود نمونه از قالب خارج و به مدت ۲۸ روز در مخزن آب نگهداری شده است.

نگهداری ۷ روز با توجه به خاصیت بسیار بالای واکنش دهندگی نانو سیلیس در ترکیب است.

علت افت مقاومت در ۱/۵ درصد از ذرات نانو سیلیس، افزایش مقدار نانو سیلیس موجود در ترکیب نسبت به مقدار لازم برای انجام واکنش با کلسیم دی اکسید است. در نتیجه مقدار اضافه از نانو سیلیس در ترکیب بدون واکنش باقی می ماند که بدون هیچ اثر مثبتی در مقاومت بتن است. البته این مقدار نانو سیلیس اضافه بر جا مانده می تواند باعث ایجاد زون های ضعیف نیز در ترکیب بتن شود. همچنین این شرایط را می توان اینگونه تفسیر کرد که وجود ذرات نانو سیلیس اضافه در ترکیب باعث تغییر شکل ژل CSH از حالت اصلی خود به حالت C5S6H5 می شود که ویژگی های مقاومتی کمتری نسبت به حالت اصلی دارد.

چون در اکثر سازه ها به خصوص سازه های زیر زمینی مقاومت زودرس بتن مورد نیاز است ملاحظه می شود که در روزهای ابتدایی از زمان نگهداری (۷ روز) مقاومت بتن با نانو ذرات سیلیس تقریباً تا ۷۰ درصد نسبت به حالت بتن معمولی افزایش یافته که این افزایش مقاومت در ۲۸ روز تقریباً به ۳۰ درصد می رسد. با توجه به تمامی دلایل بیان شده جای خالی رفتار مکانیکی و در واقع دلیل آن از دیدگاه مکانیکی و چگونگی عملکرد ساختار درونی این نوع جدید از بتن ها، کاملاً مشهود است. البته در ادامه این تغییر مقاومت را با توجه به تغییر در مکانیزم شکست نمونه های بتنی همراه نانو ذرات سیلیس و بتن های بدون نانو ذرات سیلیس می تواند بررسی شود.

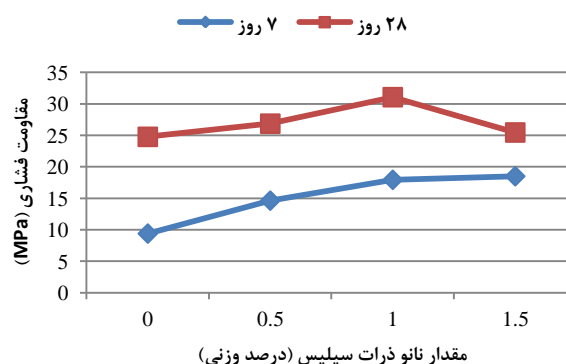
۵-۲- چقرمگی شکست

روش های استاندارد و مختلفی برای تعیین چقرمگی شکست یا فاکتور شدت تنش بحرانی برای بتن وجود دارد. اغلب، این روش ها نیاز به نمونه های بزرگ و مستطیلی شکل دارند. ساخت نمونه ها در این ابعاد به ویژه در محل پروژه (به-طور مثال شاکریت) مشکلات و محدودیت هایی از نظر انجام

افزایش می یابد ولی در دوره زمانی ۲۸ روز مقاومت بتن ها دارای حد بهینه در افزودنی ۱ درصد وزنی سیمان از نانو سیلیس است و در افزودنی ۱/۵ درصد وزنی سیمان از نانو سیلیس مقاومت فشاری بتن افت کرده که البته نسبت به بتن های بدون نانو سیلیس دارای مقاومت بالاتری است.

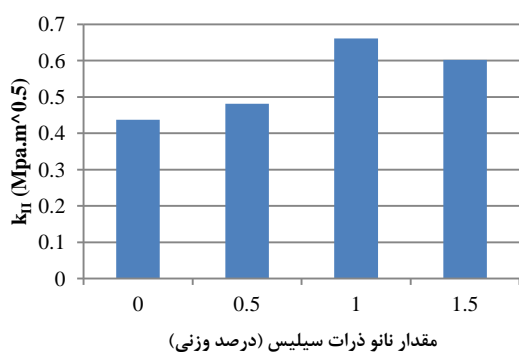
جدول ۳: میانگین مقاومت فشاری نمونه ها در بازه های مختلف از زمان نگهداری

نمونه	نانو ذرات سیلیس (درصد وزنی)	نتایج آزمایش مقاومت فشاری (MPa)	
		روز ۷	روز ۲۸
C (کنترل)	۰	۹/۴۱	۲۴/۷۷
Nc1	۰/۵	۱۴/۶۴	۲۶/۸۶
Nc2	۱	۱۷/۹۵	۳۱/۰۷
Nc3	۱/۵	۱۸/۵۱	۲۵/۴۶



شکل ۶: اختلاف مقاومت فشاری در بازه های زمانی مختلف برای هر دو نوع نمونه بتن

پخش شدن نانو سیلیس در خمیره ی سیمان نقش بسیار پر اهمیتی دارد، علاوه بر خاصیت بالای پرکنندگی نانو سیلیس در خلل و فرج موجود در خمیره، خاصیت پوزولانی بالا و همچنین اثر کم کردن فضای منطقه انتقال (TZ) که بین سنگدانه ها و خمیره سیمان شکل می گیرد را دارد. دلیل رسیدن به مقاومت بالا در این نوع بتن ها در واقع از بین بردن سریع $Ca(OH)_2$ تشکیل شده در فرایند ترکیب آب با سیمان به خصوص در زمان های اولیه ترکیب و همچنین زمان



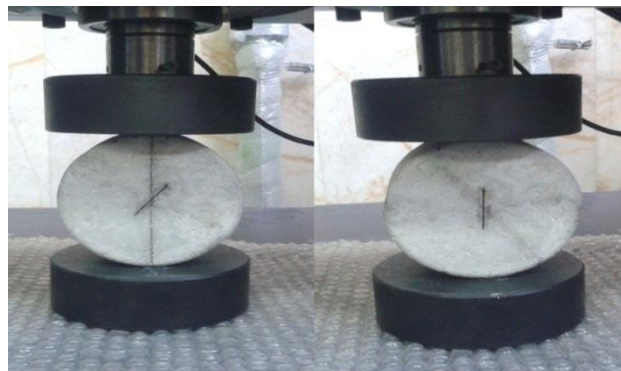
شکل ۹: تغییرات چقرمگی شکست مد برش خالص برای هر دو نوع بتن

ملاحظه می‌شود که چقرمگی شکست برای هر دو حالت کشش و برش خالص همانند رفتار مقاومت فشاری نمونه‌ها، برای بتن با نانو ذرات سیلیس نسبت به بتن بدون نانو ذرات سیلیس (معمولی) بیشتر است و این افزایش در مقدار چقرمگی شکست برای هر دو حالت کشش و برش دارای حد بهینه در ۱ درصد وزنی سیمان از افزودنی نانو ذرات سیلیس است، البته در ۱/۵ درصد افزودنی نانو سیلیس همچنان چقرمگی شکست بیشتری نسبت به بتن معمولی دارد. تغییرات افزایشی چقرمگی شکست مد کشش خالص و برش خالص با مسلح کردن خمیره بتن با نانو ذرات سیلیس نسبت به بتن معمولی را می‌توان به تغییرات مقاومت فشاری، همگن‌تر شدن محیط و پارامترهای دیگری نسبت داد که در ادامه مورد بحث قرار می‌دهیم. همان‌گونه که اشاره شده است، چقرمگی در واقع به نوعی مقاومت ذاتی ماده در برابر رشد ترک است. بنابراین مشخص است که با مقاومت فشاری ماده رابطه مستقیم داشته باشد و این ذات ترک‌های برشی است که مقدار عددی بیشتری در چقرمگی شکست نسبت به ترک‌های کششی ایجاد می‌کنند.

۳-۵ تغییرات رخدادهای ثبت شده

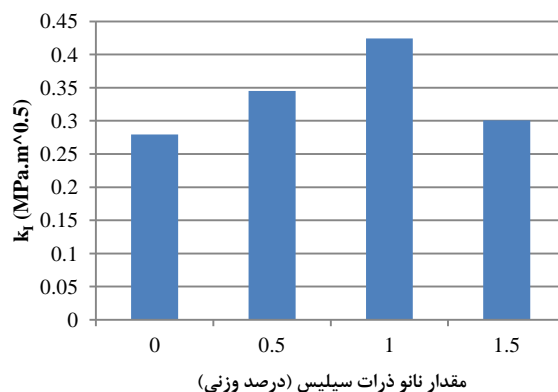
یکی از مهم‌ترین پارامترهای سیستم انتشار آوایی که می‌توان بررسی کرد، تغییرات تعداد کانت تولیدی برای هر دو نوع بتن معمولی و همراه با نانو ذرات سیلیس در بازه زمان‌های مختلف نگهداری است. شکل ۱۰ تغییرات تعداد کانت‌های

آزمایش دارد. در شکل ۷ نحوه قرارگیری نمونه‌ها برای هر دو حالت برش و کشش خالص در طی انجام آزمایش نشان داده شده است.



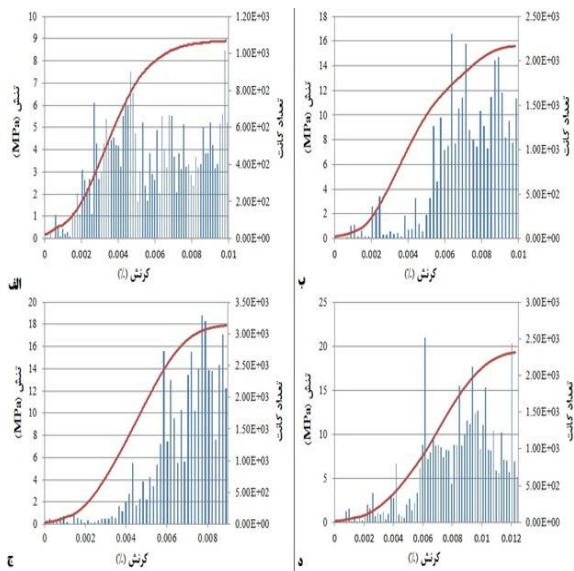
شکل ۷: نحوه قرارگیری نمونه‌ها برای حالت کشش خالص (سمت راست) و برش خالص (سمت چپ)

با توجه به مطالب بیان شده در مقدمه، آزمایش چقرمگی شکست روی نمونه‌های بتنی معمولی و همراه با نانو ذرات سیلیس در مدت زمان نگهداری ۲۸ روز انجام شده است. تغییرات چقرمگی شکست را می‌توان برای دو حالت کشش و برش خالص به ترتیب در شکل‌های ۸ و ۹ مشاهده کرد.



شکل ۸: تغییرات چقرمگی شکست مد کشش خالص برای هر دو نوع بتن

سیلیس در ابتدای ترکیب شدن آن‌ها است و این امر در سازه‌های زیرزمینی حساس به نگهداری بسیار مهم است. در ادامه مرحله دوم مانند بتن معمولی در پی اعمال بار سیگنال‌های به مراتب با بزرگی بیشتری نسبت به بتن معمولی به دلیل افزایش پیوستگی در ساختار بتن و یا به عبارت بهتر افزایش مقاومت به شکست در ساختار بتن ثبت شده است. همچنین در مرحله آخر می‌توان افزایش به یکباره کانت‌ها را در لحظه شکست نمونه مشاهده کرد که باز هم نسبت به بتن معمولی بیشتر است.

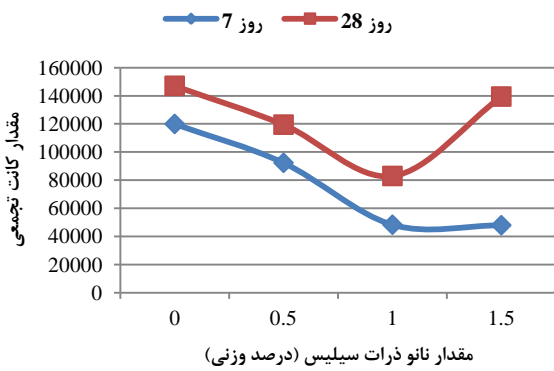


شکل ۱۰: تغییرات کانت بر حسب نمودار تنش-کرنش در زمان نگهداری ۷ روز برای نمونه بتن‌های (الف) معمولی (ب) با ۰/۵ درصد نانو سیلیس (ج) با ۱ درصد نانو سیلیس و (د) با ۱/۵ درصد نانو سیلیس

همچنین می‌توان در شکل ۱۲ تغییرات تجمعی از کانت‌ها تولیدی برای هر دو نوع بتن معمولی و همراه با نانو ذرات سیلیس در بازه زمان‌های مختلف نگهداری را نیز مشاهده کرد. ملاحظه می‌شود که در یک بازه زمان مشخص با اضافه کردن نانو ذرات سیلیس مقدار کانت تولیدی به شدت نسبت به بتن معمولی کاهش می‌یابد و همچنین این کاهش روندی خطی در زمان نگهداری ۷ روز و روندی غیر خطی در زمان نگهداری ۲۸ روز دارد.

تولیدی نسبت به نمودار تنش-کرنش برای هر دو نوع بتن را در زمان نگهداری ۷ روز و شکل ۱۱ برای زمان نگهداری ۲۸ روز نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که برای بتن بدون نانو ذرات سیلیس (معمولی) روند تغییرات کانت تقریباً یکسان بوده و در مرحله اول از نمودار تنش-کرنش که مربوط به بسته شدن میکروترک‌های موجود و شکل‌گیری میکروترک‌ها در مرز ضعیف ذرات در ساختار خمیره بتن است، سیگنال‌های زیادی توسط سنسور AE ثبت می‌شود. بسته شدن ترک‌های موجود در ساختار بتن به‌عنوان منبع سیگنال AE توسط رانجیث و همکاران گزارش شده است [۱۸]. در ادامه، مرحله دوم از نمودار تنش-کرنش کانت‌های تولیدی بنابر رشد ترک‌های پایدار افزایش می‌یابد که می‌توان منبع تولید کانت‌ها در این مرحله را اتصال ترک‌های موجود به یکدیگر، رشد ترک‌های اطراف اتصال سنگ‌دانه با خمیره و ایجاد شدن خلل و فرج بزرگ‌تر در ساختار دانست. اما در مرحله سوم و جاییکه رشد ترک‌ها بنابر افزایش مقدار نیرو تا حد بحرانی از تحمل ساختار ناپایدار شده و باعث جدایی سنگ‌دانه از خمیره بتن می‌شود، افزایشی یکباره در مقدار سیگنال‌های ثبت شده توسط سیستم AE مشاهده می‌شود.

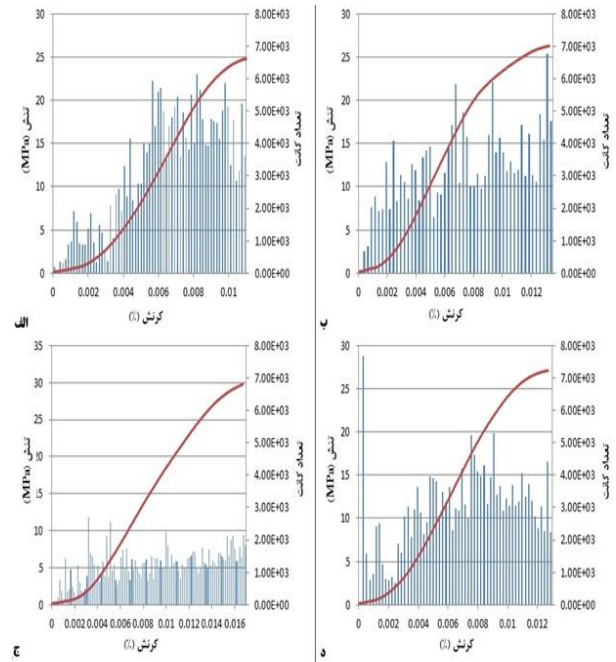
روند کلی برای تغییرات کانت‌های تولیدی در بتن‌های همراه با نانو ذرات سیلیس در مقایسه با بتن معمولی دارای همان سه مرحله است اما با دقت در نمودارها و مقایسه آن‌ها با هم کاملاً مشهود است که در مرحله اول از نمودار تنش-کرنش بزرگی کانت‌های ثبت شده بسیار کوچک است که با توجه به مطالب گفته شده برای بتن معمولی در طی اعمال بار، تأثیر مثبت نانو ذرات در حذف خلل و فرج موجود در خمیره و همچنین تأثیر مثبت آن در کم کردن میکروترک‌های اطراف اتصال سنگ‌دانه‌ها که منشا تولید سیگنال AE می‌باشند، مشهود است. البته این تغییر رفتار در ایجاد کانت‌های با شدت کمتر در مرحله اولیه از اعمال بار به خوبی در مدت زمان نگهداری کم بتن یعنی ۷ روز خود را نشان می‌دهد و این به علت تأثیرگذاری بسیار بالای نانو ذرات



شکل ۱۲: تغییرات تجمعی کانت تولیدی برای هر دو نوع بتن در بازه زمان نگهداری ۷ و ۲۸ روز

۴-۵ گسترش ترک پایدار و ناپایدار

تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که مطابق نمودار تنش-کرنش، شروع رشد ترک پایدار در نمونه‌های تحت بار، از انتهای ناحیه الاستیک تا قبل از شکست نهایی نمونه است. برخی محققان این بازه را بر روی نمودار تنش-کرنش ۴۰ تا ۸۰ درصد مقاومت نهایی فرض می‌کنند [۱۹]. همان طور که در قسمت قبل ذکر شد در مرحله دوم از نمودار تنش-کرنش افزایش تدریجی و پایداری را در نمودار رخدادهای AE برای هر دو نوع نمونه بتنی مشاهده می‌کنیم تا جاییکه تقریباً نمودار تنش کرنش به صورت افقی شود. این منطقه معرف گسترش ترک پایدار در نمونه است. همچنین در ادامه با کمی افزایش در مقدار بار تا حد شکست یا حد نهایی، به یکباره رخدادهای AE به طور چشمگیری افزایش می‌یابند که حاکی از ترک خوردگی ناپایدار در نمونه است. با توجه به نمودارهای ارائه شده از کانت‌های تولیدی می‌توان مقدار تنش در انتشار ترک پایدار را برای هر دو نوع نمونه‌ها به دست آورد، همچنین درصد سطح تنش مربوط به گسترش ترک ناپایدار را می‌توان از تقسیم مقدار تنش در گسترش ترک ناپایدار بر مقدار تنش متوسط نمونه محاسبه کرد که این مقادیر در جدول ۴ آورده شده است. ملاحظه می‌شود که مقدار درصد از سطح تنش ناپایدار نسبت به زمان برای هر دو نوع نمونه بتنی افزایش یافته است و این موضوع بنا به تولید CSH ژل‌های بیشتر و



شکل ۱۱: تغییرات کانت بر حسب نمودار تنش-کرنش در زمان نگهداری ۲۸ روز برای نمونه بتن‌های (الف) معمولی (ب) با ۰/۵ درصد نانو سیلیس (ج) با ۱ درصد نانو سیلیس و (د) با ۱/۵ درصد نانو سیلیس

مطابق نمودارهای تجمعی به دست آمده ملاحظه می‌شود که در مدت زمان نگهداری ۷ روز با افزودن نانو ذرات سیلیس به بتن مجموع کانت‌ها روند کاهشی خطی دارند و البته برای ۱ و ۱/۵ درصد از افزودنی نانو ذرات سیلیس تعداد کانت تولیدی تقریباً یکسان است، اما این روند حالتی غیر خطی در مدت زمان نگهداری ۲۸ روز پیدا می‌کند که دلیل این رفتار مقدار حجم اضافه نانو ذرات در ترکیب است که باعث افت رفتار مقاوم به شکست نمونه نسبت به حالت بهینه می‌شود که البته نسبت به بتن معمولی همچنان کانت تولیدی کمتری دارد. در واقع بتن تولید شده با نانو ذرات دارای ساختار بسیار مستحکم در مقابل شکست با وجود افزایش مقاومت دارد. به بیان بهتر ساختاری که شکل می‌دهد دارای عملکرد بسیار بهتری نسبت به بتن معمولی در پی اعمال بار و سیگنال‌های ثبت شده طی مکانیزم شکست داخلی حاصل در نمونه دارد.

۵-۵ تغییرات مد رفتار شکست

بررسی تغییرات رفتار شکست در ساختار مواد از مهم‌ترین پارامترهای سیستم انتشار آوایی است که کمک شایانی در تجزیه و تحلیل رفتارهای متفاوت مواد در حین شکست یا اعمال بار دارد. مطابق تحقیقات گذشته، مقادیر بالا از زاویه خیز بیانگر تسلط ترک‌های برشی در مکانیزم شکست از ساختار مواد می‌باشند [۲۳، ۲۲، ۱۱]. مشاهده می‌شود که بتن با مقدار بهینه از نانو ذرات سیلیس بیشترین مقدار زاویه خیز را دارد که این مسئله حاکی از رفتار برشی میکرو ترک‌ها در این نوع بتن نسبت به بتن معمولی دارند. به بیان دیگر نانو ذرات سیلیس می‌توانند در ساختار بتن باعث تغییر رفتار میکرو ترک‌ها در حین مکانیزم شکست از حالت کششی به برشی می‌شوند که این امری مسلم و تأثیر گذار بر روی مقاومت این نانو بتن‌ها خواهد بود. همچنین بتن معمولی دارای بیشترین مقدار فرکانس متوسط است که ناشی از رفتار کششی میکرو ترک‌ها در ساختار این نوع بتن است که باعث ضعف در ساختار و پایین بودن مقاومت آن‌ها نسبت به نانو بتن‌ها می‌شود. تغییر رفتار میکرو ترک‌ها در حین اعمال بار برای دو نوع بتن معمولی و همراه نانو ذرات سیلیس در مقدار بهینه از افزودنی نانو ذرات سیلیس (۱٪) را می‌توان در شکل ۱۳ مشاهده کرد. در بتن معمولی کاهش نسبی میکرو ترک‌های برشی در حین اعمال بار مشاهده می‌شود و در نقطه مقابل این نانو بتن است که با رفتار سریع از میکرو ترک‌های برشی و کاهش نسبی میکرو ترک‌های کششی در حین مکانیزم شکست ظاهر می‌شود.

کاهش منطقه گذار (TZ) بین خمیره و سنگ‌دانه‌ها در پی افزایش مدت زمان نگهداری است. اما نمونه‌های حاوی نانو ذرات سیلیس سطح درصد بالاتری نسبت به بتن معمولی دارند. در واقع این امر نشان‌دهنده این واقعیت است که نمونه‌های نانو بتن تحمل تنش‌های بالاتر بدون گسترش ترک ناپایدار را نسبت به بتن معمولی دارند و یا به عبارت بهتر نانو ذرات سیلیس باعث تاخیر در گسترش ترک ناپایدار در ساختار نمونه‌ها می‌شود. نانو ذرات سیلیس می‌توانند در ساختار بتن علاوه بر تمامی ویژگی‌های بیان شده آن‌ها نقش سنگ‌دانه را نیز ایفا کنند یعنی حجمی از این نانو ذرات که در ساختار بدون واکنش باقی مانده است باعث گیر و یا مانع برای گسترش نانو و میکرو ترک‌ها می‌شود که از مطالعات قبل ثابت شده است که سنگ‌دانه‌های موجود در ساختار بتن به‌عنوان یکی از مکانیزم‌های مقابل در گسترش ترک یا افزایش چقرمگی شکست است [۲۰، ۲۱]. بنابراین با توجه به تمامی مطالب بیان شده می‌توان گفت که نانو ذرات سیلیس در بتن باعث افزایش مقاومت ساختار بتن یا بتن با مقاومت بالای باربری بدون گسترش در ترک‌های ناپایدار در مقایسه با نوع معمولی خود می‌شود.

جدول ۴: مقادیر تنش در گسترش ترک ناپایدار در زمان نگهداری

مختلف از نمونه‌ها

نمونه	مدت زمان نگهداری	نانو ذرات سیلیس (درصد وزنی)	مقدار تنش در گسترش ترک ناپایدار	درصد $(\frac{\sigma_{uc}}{\sigma_{av}})$
C (کنترل)	۷	۰	۸/۸۸	۸۹
Nc1		۰/۵	۱۵/۲۶۴	۹۱/۵
Nc2		۱	۱۷/۶۶۴	۹۴
Nc3		۱/۵	۱۹/۰۵۶	۹۶
C (کنترل)	۲۸	۰	۲۳/۲۸	۹۳
Nc1		۰/۵	۲۵/۶۸	۹۶/۵
Nc2		۱	۲۹/۴۷۲	۹۸
Nc3		۱/۵	۲۶	۹۵

۷۰ درصد نسبت به حالت بتن معمولی و در ۲۸

روز نگهداری تقریباً به ۳۰ درصد رسیده است.

۳. تغییرات چقرمگی شکست نیز مانند مقاومت نمونه-

های بتن معمولی و همراه با نانو ذرات سیلیس

به صورت غیرخطی و برای نانو بتن‌ها نسبت به

حالت بتن معمولی بیشتر است. به گونه‌ای که

بیشترین چقرمگی شکست در هر دو حالت

بارگذاری کششی و برشی، مربوط به نمونه‌هایی با

افزودنی نانو ذرات سیلیس در حد بهینه از مقدار

خود است.

۴. اضافه کردن نانو ذرات سیلیس باعث کاهش مقدار

تجمعی کانت تولیدی نسبت به بتن معمولی در هر

دو بازه زمانی شده است. در واقع نقش نانو ذرات

سیلیس در کاهش نقایص موجود در خمیره بتن را

نشان می‌دهد. البته در بازه زمانی ۷ روز با توجه به

واکنش پذیری سریع نانو ذرات در ۱/۵ درصد وزنی

سیمان نیز کاهش تولید کانت به چشم می‌خورد اما

این روند حالتی غیر خطی در زمان نگهداری ۲۸

روز پیدا می‌کند.

۵. تنش در گسترش ترک ناپایدار با توجه به تکنیک

AE برای هر دو نوع نمونه بتنی شناسایی شده

است. می‌توان نتیجه گرفت که گسترش ترک

ناپایدار در بتن معمولی آسان‌تر از بتن همراه با نانو

ذرات سیلیس است.

۶. بتن تولیدی با نانو ذرات سیلیس بیشترین زاویه

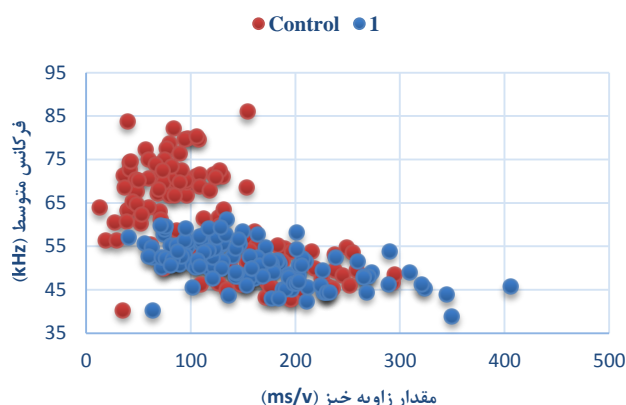
خیز و کمترین فرکانس متوسط نسبت به بتن

معمولی را دارد. بنابراین غالب میکرو ترک‌ها در

نمونه‌های بتن معمولی کششی و در نمونه‌های نانو

بتن برشی است، در واقع می‌تواند نوعی تغییر رفتار

از مد کشش به برش در نمونه‌ها ایجاد شده باشد.



شکل ۱۳: ارتباط بین مقدار زاویه خیز و فرکانس متوسط برای هر دو نوع بتن در مدت نگهداری ۲۸ روز

۶- نتایج

مقاله پیش رو مطالعه‌ای از تجزیه و تحلیل تأثیر نانو ذرات سیلیس و مکانیزم عملکرد نانو بتن‌ها در حین اعمال نیرو و شکست است که با آزمایش‌های استاندارد مختلف و بهره‌گیری از تکنیک انتشار آوایی (AE) انجام شده است. بر اساس مشاهدات و تجزیه و تحلیل‌های انجام گرفته در این قسمت نتایج به صورت خلاصه گرد آوری و بیان شده است.

۱. افزودن نانو ذرات سیلیس به خمیره بتن باعث

افزایش مقاومت بتن نسبت به بتن در حالت

معمولی (ترکیب سیمان، آب و سنگ‌دانه) می‌شود.

البته مقدار افزودن نانو ذرات سیلیس دارای مقدار

بهینه است (۱٪) که بیشتر از آن مقدار نیز تأثیر

مثبت بر مقاومت نسبت به حالت بتن معمولی دارد

اما به دلیل افت مقاومت نسبت به حالت بهینه و

افزایش هزینه‌ها این امر توجیه اقتصادی نخواهد

داشت.

۲. اکثر سازه‌های مهندسی به خصوص سازه‌های زیر

زمینی نیاز به مقاومت زودرس بتن دارند که در

آزمایش‌های صورت گرفته افزایش مقاومت فشاری

در دوره ابتدایی از زمان نگهداری ۷ روز تقریباً تا

مراجع

- [12] Nejati HR, Ghazvinian A. Brittleness Effect on Rock Fatigue Damage Evolution. *Rock Mech Rock Eng* 2013;47(5): 1839-1848.
- [13] Soulioti, D., Barkoula, N.M., Paipetis, A., Matikas, T.E., Shiotani, T. 2009. "Acoustic emission behavior of steel fiber reinforced concrete under bending". *Constr Build Mater*, 23 (12), pp. 3532–3536
- [14] Ghazvinian, A., Nejati, H.R., Sarfarazi, V., Hadei, M.R., 2012." Mixed mode crack propagation in low brittle rock-like materials". *Arab J Geosci*, 6 (11), pp. 4435-4444.
- [15] Khan, Kh., 1998. "Fracture toughness investigation of an indigenous limestone rock formation". M. Sc. thesis, king Fahd University.
- [16] ISRM Testing Commission, 1995. Suggested method for determining mode I fracture toughness using cracked Chevron notched Brazilian disc (CCNBD) specimens. *Rock Mech Min Sci Geomech*, 32, pp. 57-64.
- [17] ASTM C109, 2008. Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (using 2-in. or [50-mm] cube specimens). Annual book of ASTM standards. Philadelphia (PA).
- [18] Ranjith, P.G., Jasinge, D., Song, J.Y., Choi, S.K., 2008. "A study of the effect of displacement rate and moisture content on the mechanical properties of concrete: Use of acoustic emission". *Mech Mater*, 40 (6), pp. 453–469.
- [19] Akcay, B., Agar-Ozbek, A.S., Bayramov, F., Nuri Atahan, H., Tasdemir, M.A., Sengul, C., 2012." Interpretation of aggregate volume fraction effects on fracture behavior of concrete". *Constr Build Mater*, 28 (1), pp. 437–443.
- [20] Zhang P, Zhao Y, Liu Ch, Wang P, Zhang T. Combined effect of nano-SiO₂ particles and steel fibers on flexural properties of concrete composite containing fly ash. *Sci & Eng of Comp Mat* 2014;21(4):597-605.
- [21] Heidari A, Tavakoli D. A study of the mechanical properties of ground ceramic powder concrete incorporating nano-SiO₂ particles. *Const and Buil Matl* 2013;38:255–64.
- [1] Roylance, D., 2001. "Introduction to fracture mechanics". *MIT print*, MA 02139.
- [2] Shah, S.P., Ouyang, Ch., 1995. "Failure of concrete: Fracture mechanics approach", *Anal d meca del frac*, 9, pp. 352-375.
- [3] Zhang P, Zhao Y, Li Q, Zhang T, Wang P. Mechanical properties of fly ash concrete composites reinforced with nano-SiO₂ and steel fiber. *Current Sci* 2014;106(11):1529-1537.
- [4] Kumar, Sh., Barai, S.V., 2011."Concrete Fracture Models and Applications". ISBN 978-3-642-16763-8. Germany: Springer.
- [5] Zhang P, Liu Ch, Li Q, Zhang T, Wang P. Fracture properties of steel fiber reinforced high performance concrete containing nano-SiO₂ and fly ash. *Current Sci* 2014;106(7):980-987.
- [6] Bjornstrom, J., Martinelli, A., Matic, A., Borjesson, L., Panas, I., 2004. "Accelerating effects of colloidal nano-silica for beneficial calcium-silicate-hydrate formation in cement". *Chem Phys Lett*, 392 (1–3), pp. 242–8.
- [7] Li, H., Xiao, H-g., Yuan, J., Ou, J., 2004. "Microstructure of cement mortar with nano-particles". *Compos B Eng*, 35(2), pp.185–189.
- [8] Lee, S.J., Kriven, W.M., 2005. "Synthesis and hydration study of Portland cement components prepared by the organic steric entrapment method". *Mater & Struct*, 38(1), pp. 87–92.
- [9] Lin, D.F., Lin, K.L., Chang, W.C., Luo, H.L., Cai, M.Q., 2008. "Improvements of nano-SiO₂ on sludge/fly ash mortar". *Waste Manage*, 28(6), pp. 1081–7.
- [10] Guz, I.A., Rodger, A.A., Guz, A.N., Rushchitsky, J.J., 2007. "Developing the mechanical models for nanomaterials". *Comp: Part A*, 38 (4), pp. 1234–1250.
- [11] Grosse, Ch.U., Ohtsu, M., 2008. "Acoustic Emission Testing: Basics for research-applications in civil engineering". ISBN 978-3-540-69895-1. Germany: Springer.

[23] Sabri M, Ghazvinian A, Nejati HR. Effect of particle size heterogeneity on fracture toughness and failure mechanism of rocks. *Int J of Rock Mech & Mining Sci* 2016; 81:79-85.

[22] Aggelis, D.G., Soulioti, D.V., Sapouridis, N., Barkoula, N.M., Paipetis, A.S., Matikas, T.E., 2012.” Acoustic emission characterization of the fracture process in fibre reinforced concrete”. *Constr Build Mater*, 25 (11), pp. 4126-4131.

-
- ¹ . Central Straight-through Crack Brazilian Disk
 - ² . ISRM
 - ³ . Acoustic Emission
 - ⁴ . Atkins
 - ⁵ . Atkinson
 - ⁶ . Stable cracks