



# ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

ISSN ۲۹۸۰-۷۷۸۶

زمان چاپ: ۱۴۰۳/۰۲/۲۵

شماره مجوز مجله: ۸۰۴۰۰

## ترک خوردگی در بتن های سیمانی و سازه های بتن مسلح

آرمان ختار<sup>۱</sup>، آرزو ختار<sup>۲</sup>، محسن پورصفر<sup>۳</sup>

۱-مدرس گروه عمران، دانشگاه ایلام

[khatar.arman@gmail.com](mailto:khatar.arman@gmail.com)

۲-مدرس گروه معماری، دانشگاه پیام نور ایلام

[Arezoo.khatar@gmail.com](mailto:Arezoo.khatar@gmail.com)

۳-دانشجوی مهندسی عمران دانشگاه ایلام

[mohsen.prs1376@gmail.com](mailto:mohsen.prs1376@gmail.com)

### چکیده:

ترک ها و حفره ها به دو شکل اساسی آسیب به سازه بتنی تعلق دارند که ممکن است ظرفیت تحمل بار و تنگی سازه را کاهش داده و منجر به خرابی و فاجعه در سازه های ساختمانی شود. ترک بیش از حد و کنترل نشده عنصر ساختاری ممکن است باعث خوردگی و تضعیف چسبندگی تقویت کننده موجود در آن شود. علاوه بر این ، ترک در ساختار بر زیبایی آن تأثیر منفی می گذارد و در موارد شدید ممکن است باعث ناراحتی افرادی شود که در چنین ساختمانی اقامت دارند. بنابراین، مقاله زیر بررسی عمیق مسائل مربوط به تشکیل و توسعه آسیب و ترک در ساختار کامپوزیت های بتنی را ارائه می دهد. این بر علل شروع ترک تمرکز دارد و انواع اساسی آنها را مشخص می کند. همچنین یک مرور کلی از رایج ترین روش های مورد استفاده برای تشخیص و تجزیه و تحلیل شکل میکرو ترک ها و تشخیص مسیر انتشار آنها ارائه شده است. انواع ترک های موجود در کامپوزیت های بتنی را می توان بر اساس هشت معیار خاص تقسیم کرد. در عناصر بتن مسلح ، ماکروت ترک ها به نوع بارهای غالب بستگی دارند ، در حالی که میکرو ترک ها با مورد خاص آنها ارتباط دارند. تجزیه و تحلیل های انجام شده نشان می دهد که میکروکراک ها معمولا در عناصر تنش دار به شکل راست هستند ؛ در عناصر برش ، میکروکراک های بال با بال های مستقیم وجود دارد ؛ و تنش های پیچشی باعث تغییر در مورفولوژی میکروکراک بال می شود که نوک بال ها پیچ خورده است. لازم به ذکر است که موضوع ریزگردها و ترک ها در بتن و سازه های ساخته شده از این ماده از بسیاری جهات مهم است زیرا در یک رویکرد جامع، دوام ساختمان ها، ایمنی افرادی که در ساختمان ها اقامت دارند و هزینه های مربوط به تعمیرات احتمالی عناصر ساختاری آسیب دیده است. بنابراین ، این مشکل باید در زمینه ارزیابی فرایندهای ترک و شکستگی، هم در کامپوزیت های بتنی و هم در سازه های بتنی تقویت شده، بیشتر مورد بررسی قرار گیرد.

**کلمات کلیدی:** بتن سیمان، سازه های بتنی، ترک خوردگی، تنش های بحرانی، منطقه انتقال بین سطحی (ITZ)

۱. مقدمه



# ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

ISSN ۲۹۸۰-۷۷۸۶

یکی از وظایف اصلی مهندسی مواد مدرن در زمینه ساخت و ساز طراحی و اجرای ساختمان ها به گونه ای است که با کمترین هزینه مالی ممکن به بیشترین ایمنی ممکن سازه دست یابد [۱،۲]. خواص مواد بتنی ، از جمله دوام آنها ، عمدتاً توسط عوامل ساختاری و روابط متقابل بین میکرو و ماکروساختار مواد تعیین می شود [۳،۴،۵،۶]. ترک ها و حفره ها به دو شکل اساسی آسیب به سازه بتنی تعلق دارند که ممکن است: کاهش ظرفیت تحمل بار و سفتی سازه [۷،۸] ؛ باعث از بین رفتن سفتی عنصر سازه و توقف کار به عنوان مقطع بتن مسلح کامل [۹،۱۰] ؛ منجر به خرابی و فاجعه در سازه های ساختمانی [۱۱،۱۲] ؛ افزایش ردپای کربن بتن و مصرف انرژی در نتیجه تخریب کامل (ناشی از آسیب و ترک) و نیاز به ساخت سازه های جدید با استفاده از سیمان غیر زیست محیطی و مصرف کننده انرژی [۱۳،۱۴،۱۵] را در پی داشته باشد.

به همین دلیل، دانش و درک پدیده هایی که باعث ایجاد ترک در سازه های بتنی تقویت شده و نشان دادن مکان های شایع ترین وقوع آنها می شود از بسیاری جهات بسیار مهم است [۱۶،۱۷]. همچنین مهم است که تعیین کنیم چگونه این قطعیت های مادی را در عناصر ساختاری شناسایی کنیم تا انتشار بیشتر آنها به طور موثر مهار شود ، بنابراین از بتن و در نتیجه ساختار تشکیل شده از تخریب تدریجی آنها محافظت می شود [۱۸،۱۹،۲۰،۲۱].

مقاله زیر بررسی عمیق مسائل مربوط به تشکیل و توسعه آسیب و ترک در ساختار کامپوزیت های بتنی را ارائه می دهد [۲۲،۲۳]. تمرکز اصلی بر علل شروع ترک و ویژگی های انواع اساسی آنها است. در بخش پایانی مروری بر متداولترین روشهای تشخیص و تحلیل شکل ریزگردها و تشخیص مسیر تکثیر آنها ارائه شده است. این مقاله شامل یک بررسی کامل از ادبیات موجود در مورد تشکیل و انتشار ترک در عناصر بتن غیر تقویت شده و عناصر ساختاری بتن تقویت شده با تقویت کننده های شل است. بر اساس مطالعات انجام شده، مشخص شده است که هیچ مشخصه دقیقی در ادبیات انتشار ترک ها در عناصر بتن مسلح بسته به نوع بارهای موجود در ساختار وجود ندارد. علاوه بر این، هیچ اطلاعاتی در مورد ماهیت میکرو ترک های بتنی از نظر نوع استرس که منجر به شروع آنها شد، پیدا نشده است. این مقاله تلاش می کند تا این شکاف را پر کند.

برای این منظور ، در زمینه ترک های عنصر بتن مسلح ، مورفولوژی ها و مسیرهای انتشار ترک بسته به بار و تنش های موجود در ساختار متمایز شده اند. علاوه بر این ، بر اساس مطالعات خود ما در مورد میکروساختار عناصر بتنی آسیب دیده تحت تنش ، برش و پیچش ، سه تصویر مورفولوژیکی مختلف از مسیرهای انتشار میکروکراک که در ساختار مواد رخ می دهد ، متمایز شده است.

با تشکر از این تحلیل های جدید که قبلاً در ادبیات موضوعی شرح داده نشده است ، می توان تصاویر تجزیه و تحلیل ریزساختاری را با تصاویر تخریب عناصر ساختاری بتن مسلح در اندازه کامل پیوند داد. چنین دانش ممکن است در تشخیص آسیب ماکروسکوپی در سازه های بتنی تقویت شده مفید باشد ، زمانی که برای تعیین علت ترک یا آسیب و زمانی که هیچ داده دقیق یا غیر مبهم در مورد موردی که رخ داده است وجود ندارد.

با این حال ، در این مرحله ، باید توجه داشت که در سازه های بتنی فعلی ، تقویت بتن یا تقویت مناطق تنش یا برش نیز می تواند با استفاده از مواد غیر از فولاد تقویت کننده سنتی انجام شود. انواع مختلفی از مواد کامپوزیت یا الیاف برای این منظور استفاده می



# ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

ISSN ۲۹۸۰-۷۷۸۶

شود. در ادبیات، نمونه های متعددی از مزایای استفاده از چنین مواد را ، مانند: کامپوزیت های پلیمری تقویت شده با فیبر شیشه ای (gfrp) [۲۴،۲۵،۲۶،۲۷،۲۸،۲۹] ؛ کامپوزیت های پلیمری تقویت شده با فیبر کربن (CFRP) [۳۰،۳۱،۳۲،۳۳] می توان یافت.

## ۲. ادبیات پژوهش

۲.۱. مکانیسم ترک خوردگی در کامپوزیت های بتنی و مفاهیم اصلی مربوط به این موضوع

لازم به ذکر است که ترک در سازه های بتنی و بتن مسلح کاملاً رایج است. می توان گفت که آنها یک ویژگی طبیعی بتن هستند و حتی بخشی ذاتی از ساختار آن هستند [۳۴،۳۵،۳۶]. علاوه بر این ، مشاهده شده است که میکرو ساختار بتن حاوی تعداد زیادی میکرو ترک قبل از هر بارگیری است [۳۷]. به دلیل تفاوت در خواص بین خمیر سنگدانه و سیمان و همچنین انقباض و تنش های حرارتی ، اولین نقص ها در بتن ظاهر می شوند قبل از اینکه بار حتی در مناطق تماس بین شمول و ماتریس اعمال شود [۳۸،۳۹،۴۰]. طبق [۴۱]، تشکیل ترک در سازه های بتنی به تعامل مکانیکی بین شمول (سنگ ریز یا سنگ خرد شده) و ماتریس مبتنی بر سیمان بستگی دارد. در ابتدا ، خسارات به شکل میکرو ترک ها آنقدر کوچک است که تشخیص یا تجزیه و تحلیل آنها تنها با استفاده از تکنیک های تشخیص مدرن امکان پذیر است [۴۲،۴۳،۴۴،۴۵].

در بیشتر موارد ، ایجاد ترک در سازه بتن مسلح یک پدیده معمولی است و فقط در برخی موارد نشان دهنده امکان تجاوز از ظرفیت تحمل بار سازه و ایجاد نگرانی های توجیهی است [۴۶،۴۷،۴۸،۴۹،۵۰]. با این وجود ، ترک ها یک نوع رایج از آسیب های ساختاری هستند که سلامت ساختمان های بتنی (به عنوان مثال ، جاده ها ، پل ها ، تونل ها و سد ها) را به خطر می اندازند [۵۱]. بروز ترک در سازه به طور قابل توجهی تنگی بتن را کاهش می دهد و در نتیجه دوام آن را بدتر می کند. ترک بیش از حد و کنترل نشده عنصر ساختاری ممکن است باعث خوردگی و تضعیف چسبندگی تقویت کننده موجود در آن شود. همچنین واضح است که ساختارهای ترک خورده بر زیبایی شناسی تأثیر منفی می گذارند و در برخی موارد شدید ممکن است باعث ناراحتی افرادی شود که در چنین ساختمانی اقامت دارند [۵۲،۵۳،۵۴]. حقایق فوق الذکر منجر به این بیان می شود که تشکیل و گسترش ریزگردها باعث تغییرات منفی برگشت ناپذیر در ساختار بتن می شود، یعنی [۵۵،۵۶،۵۷]:

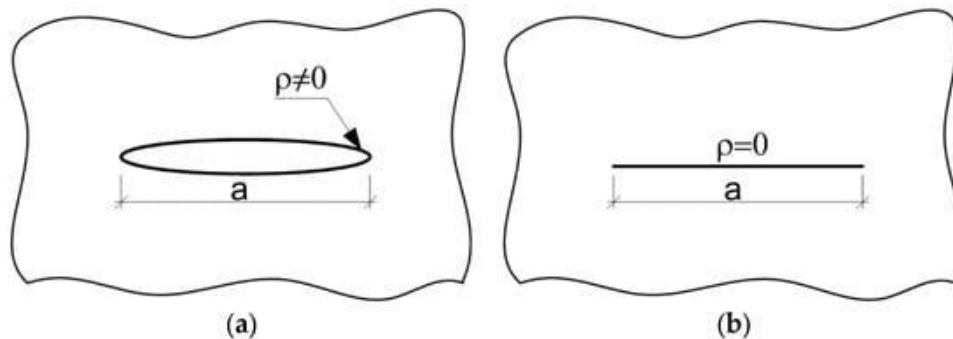
- شکل گیری حفره ها؛
- کاهش در مقطع کاری عناصر ساختاری؛
- اتلاف انرژی به شکل گرما و ارتعاشات مکانیکی؛
- ظهور سطوح جدید.

بنابراین، اگرچه ترک خوردگی در عناصر بتن مسلح یک علامت معمول یا حتی طبیعی از عملکرد ساختار است ، اما نیاز به دانش کامل در مورد علل تشکیل ترک دارد. در موارد خاص ، ترک های ساختاری ممکن است نتیجه پدیده های نگران کننده باشد ، واکنش به آن از بروز شرایط اضطراری جلوگیری می کند. فرآیند آسیب ساختار ، هنگامی که در فرآیند افزایش بارهای خارجی آغاز می شود ، باعث تجمع داخلی نقص ها به شکل میکروکراک ها و زیر میکروکراک هایی می شود که به طور فزاینده ای زنجیره های بزرگتر ترک ها را تشکیل می دهند و با تخریب کامل کل ساختار بتنی به پایان می رسند. دانش کامل از فرایندهای ترک خوردگی

که در عناصر ساخته شده از بتن رخ می دهد برای درک تخریب و مکانیسم های تخریب کامپوزیت بتن ضروری است [۵۸،۵۹،۶۰]. ترک ها نوعی جزئی از آسیب در ماده ای هستند که قبلا رخ داده اند و طبق [۶۱]، تجزیه و تحلیل مکانیسم تخریب بتن که وجود میکروکراک ها را در ساختار آن نادیده می گیرد اساسا نادرست است.

وجود ریزگردها و ناهمگونی بتن باعث توزیع ناهموار تنش ها و کشش ها در عناصر بتنی می شود. علاوه بر این، میکرو ترک های اولیه (بخش ۳ را ببینید)، با محدود کردن مقطع کاری، باعث می شود که مقاومت بتن به دست آمده در عمل کمتر از قدرت نظری باشد و در عین حال باعث طیف گسترده تری از نوسانات شود [۶۲،۶۳].

به همین دلایل، علل ترک ها و نوع آنها باید شناخته شود و موجودی و نظارت بر توسعه این خسارات باید با دقت خاصی انجام شود زیرا آنها درجه وضعیت بحرانی تنش و فشار را در ساختار تعیین می کنند. دانستن این می تواند در ارزیابی ایمنی تاسیسات عملیاتی [۶۴،۶۵] تعیین کننده باشد. بنابراین، در ابتدا باید شرح مختصری از نقص های اساسی موجود در ساختار بتنی و مفاهیم نزدیک به این موضوع ارائه شود. ترک یک نقص واقعی در مواد است که با اندازه و شکل خاصی مشخص می شود. ترک یک قطع در ساختار مواد است و در سطوحی رخ می دهد که نیروهای پیوندهای اتمی کار نمی کنند. در حالت تخلیه، سطوح ترک ممکن است با یکدیگر در تماس باشند، در حالی که در حالت بارگیری، ممکن است در برابر یکدیگر باز یا تغییر کنند. ترک ها ممکن است به عنصر نفوذ کنند، ممکن است در داخل آن وجود داشته باشند، یا تا حدی به مواد نفوذ کنند. شعاع در پایین ترک ( $\rho$ ) همیشه با صفر متفاوت است زیرا حتی در موارد شدید، به فاصله بین اتم ها نزدیک است (شکل (a) [۶۶،۶۷،۶۸]).



شکل ۱. نمودارهای نقص مواد در بتن: (الف) ترک، (ب) شکاف [۶۶،۶۷،۶۸].

از طرف دیگر، شکاف یک مدل ترک واقعی است که برای تعیین سختی شکستگی مواد ایجاد شده است. شکاف به عنوان یک مدل ریاضی از ترک دارای شعاع صفر از فیله در اوج آن است (شکل (b) [۶۶،۶۷،۶۸]). همچنین فرض بر این است که سطوح شکاف تخلیه شده صاف هستند و قسمت جلویی آن شکل منظم دارد، اغلب به شکل یک خط مستقیم. چنین فرضیاتی که تفاوت قابل توجهی با شرایط واقعی ندارند، محاسبات واضح و بدون ابهام را امکان پذیر می کند. در مورد عناصر تحت شرایط استرس پیچیده، سه نمودار برای توصیف نحوه بارگذاری در سراسر عنصر با شکاف استفاده می شود که به عنوان مدل های ترک خورده نامیده می شوند. توصیف آنها و فرمول های لازم برای تعیین سختی شکستگی مواد برای مدل های ترک I، II و III در بسیاری از نشریات در این زمینه [۶۹،۷۰،۷۱،۷۲،۷۳] در دسترس است.



# ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

ISSN ۲۹۸۰-۷۷۸۶

با این حال، با توجه به این واقعیت که نمودارهایی که انتشار ترک اولیه را بسته به نوع بار و مدل ترک اختصاص داده شده به آن نشان می دهند، استاندارد هستند و به طور کامل در ادبیات توصیف شده اند، و همچنین فرمول هایی که پایه ای برای اندازه گیری مقاومت در برابر ترک عناصر بتنی را تشکیل می دهند، این مسائل در مقاله زیر گنجانده نشده است. اطلاعات دقیق در مورد تعیین مقاومت در برابر ترک در عناصر بتنی برای مدل های مختلف ترک را می توان در آثار [۷۴،۷۵،۷۶،۷۷،۷۸،۷۹] یافت.

در عناصر بتنی، ترکهای مواد داخلی ترکها، ریزگردها هستند که از نظر عرض دهانه متفاوت هستند. تجزیه دقیق ترک ها، با در نظر گرفتن این و سایر ویژگی ها، در بخش ۴ ارائه شده است.

ترک یک قطع مواد است که عرض آن تا ۱،۰ میلی متر است و با این واقعیت مشخص می شود که ابعاد سوم آن (باز شدن) بسیار کوچکتر از بقیه (طول و عمق) است. با این حال، با نگاه کردن به ساختار ترک ها، آنها چیزی بیش از یک عدم انسجام اولیه یا ثانویه در تماس ذرات مجاور اسکلت مواد نیستند. از سوی دیگر، میکرو ترک ها به عنوان قطعیت های مواد با عرض بیش از ۰،۱ میلی متر مشخص می شوند. در عمل، در نظر گرفته می شود که این کوچکترین ترک هایی هستند که هنوز هم می توانند با چشم غیر مسلح دیده شوند، یا کوچکترین ترک های قابل مشاهده ای که در زیر میکروسکوپ نوری مشاهده می شوند. تراکم سطح میکرو ترک ها از ۰،۰۴ تا ۰،۱۴ میلی متر در ۲ میلی متر است [۸۰].

به گفته نویسندگان [۸۰]، همچنین می توان آسیب را در بتن به شکل ریزگردها تشخیص داد. چنین آزمایشاتی با استفاده از میکروسکوپ الکترونی اسکن (SEM) با بزرگنمایی حداقل ۱۲۵۰ برابر در مورد ترک هایی با عرض بیش از ۲،۵ میکرومتر یا حداقل بزرگنمایی ۲۵۰۰ برابر هنگام ارزیابی ترک های کوچکتر انجام می شود. زیر ترک ها را می توان در خمیر سیمان، در منطقه فاز ماتریس سیمان (به عنوان مثال، هیدروکسید کلسیم (CH) و هیدرات سیلیکات کلسیم (C-S-H) و در مناطق تماس بین دانه های شن و ماتریس در خشت مشاهده کرد. تراکم سطحی ریزگردها بیش از ۱۰ برابر تراکم ریزگردها است [۸۰]. مرحله اولیه تشکیل اولین نقص در میکرو ساختار بتن به عنوان هسته سازی ترک نامیده می شود. این مشکل و علل اصلی ریزگردها و ترک ها در بتن در بخش ۳ به طور مفصل تر مورد بحث قرار می گیرد. اولین ریزگردها که منبع ریزگردها در مواد هستند و قبل از استفاده از بارها بوجود می آیند، ریزگردها اولیه نامیده می شوند. این آسیب های اولیه در فرآیند ترک بتن اغلب [۸۱،۸۲،۸۳]:

- قطعیت های محلی؛
- شکستگی در انسجام مواد؛
- خسارت ناشی از یک محیط مداوم در نتیجه تجاوز محلی در قدرت.

در مرحله بعد، میکرو ترک های اولیه تحت تأثیر عوامل خارجی (افزایش بار، دما و غیره) [۸۴،۸۵] یا عوامل داخلی (به عنوان مثال، پیوندهای ضعیف بین اجزای کامپوزیت بتن) [۸۶،۸۷،۸۸،۸۹] بزرگ، گسترش و ارتباط با نقص های مجاور، میکرو ترک ها یا منافذ [۸۹]. این مرحله از فرآیند انباشت نقص در یک رویکرد محلی، تکثیر میکرو کراک نامیده می شود. به نوبه خود، تکامل و رشد ترک ها در رابطه با کل حجم عنصر بتن آسیب دیده تجزیه و تحلیل شده به اصطلاح فرآیند شکستگی است [۹۰].



# ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

ISSN ۲۹۸۰-۷۷۸۶

فرآیند شکستگی شکننده، یعنی افزایش طول میکرو ترک های فضایی انباشته شده، معمولاً یک پدیده پویا و غیرقابل برگشت با عواقب فاجعه بار است. این مربوط به این واقعیت است که در مرحله پیشرفته فرآیند شکستگی کامپوزیت، یک سیستم گسترده از ریز ترک ها و ترک ها ایجاد می شود که پس از رسیدن به سطح خاصی به دلیل بار خارجی، منجر به تجزیه کامل ساختار آن می شود [۶۳]. فرآیند تکامل آسیب و شکستگی کامپوزیت های سیمان تحت بارگذاری می تواند در مطالعه رفتار آسیب بتن [۹۱] مورد استفاده قرار گیرد. در ابتدا، پس از وقوع به اصطلاح سطح اول استرس های بحران  $\sigma_{22}^I$  در ساختار بتنی، میکرو ترک های ساده ظاهر می شوند. بر اساس داده های مختلف، مقادیر استرس که این فرآیند را آغاز می کنند بین حدود ۲۰ درصد و حدود ۵۰ درصد از مقاومت فشاری مواد (۹۲،۹۳،۹۴،۹۵)  $(f_c)$  با بار تدریجی و انباشت انرژی منتقل شده از خارج توسط عنصر بتنی، تنش ها در ساختار مواد افزایش می یابد. این منجر به تغییر در ویژگی های میکرو ترک های داخلی می شود. میکرو ترک های مستقیم به ترتیب در ساختار مواد ایجاد می شوند و سپس در برخی از نقاط، میکرو ترک های بال ظاهر می شوند (بخش ۴ را ببینید). این مرحله نشان دهنده تخریب قریب الوقوع مواد است. تعیین کننده ای که نشان می دهد چه زمانی در فرآیند شکستگی، تخریب واقعی و هنوز واقعی عنصر ساختاری رخ خواهد داد، توسط به اصطلاح سطح دوم استرس های بحرانی تعیین می شود [۹۲،۹۳،۹۴،۹۵]. این شاخص نقطه ای در منحنی افزایش استرس است که در نتیجه توسعه جهانی فرآیندهای شکستگی در بتن، پیوندهای داخلی بین اجزای کامپوزیت بتن شکسته می شود. در چنین شرایطی، لحظه تخریب یک عنصر معین فقط یک مسئله زمان است و متوقف کردن فیزیکی چنین فرایندی امکان پذیر نیست [۹۲،۹۳،۹۴،۹۵]. سطح استرس  $\sigma_{22}^I$  مربوط به مقاومت نهایی مواد در محدوده ۷۰-۹۰٪ است. نموداری که روند متریکی تخریب یک عنصر بتنی را با در نظر گرفتن هر دو سطح تنش های بحرانی نشان می دهد، که در شکل ۲ [۸۸] نشان داده شده است. با این حال، بر اساس [۸۸،۸۹،۹۰،۹۱]، جدول ۱ عوامل اصلی (مواد، فناوری و عملیاتی) را که بر سطوح تنش های بحرانی و روند تخریب بتن معمولی تأثیر می گذارد، فهرست می کند.



شکل ۲. محدوده سطوح تنش بحرانی  $\sigma_{22}^I$  و  $\sigma_{22}^II$  در بتن معمولی تحت عوامل مختلف مواد، تکنولوژی و خدمات (طبق [۹۵]).

جدول ۱. عوامل اصلی مادی، تکنولوژیکی و عملیاتی که بر سطوح تنش های بحرانی و روند تخریب بتن معمولی تأثیر می گذارند (با توجه به [۹۵،۹۶،۹۷،۹۸،۹۹،۱۰۰،۱۰۱]).

شماره	گروه عوامل تجزیه و تحلیل شده	انواع عوامل تجزیه و تحلیل شده
۱	مواد	*نوع جمع. *حداکثر اندازه دانه از کل. *درجه بندی کل



# ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

ISSN ۲۹۸۰-۷۷۸۶

شماره	گروه عوامل تجزیه و تحلیل شده	انواع عوامل تجزیه و تحلیل شده
۲	تکنولوژی	<ul style="list-style-type: none"> <li>* شرایط طبیعی گرما و رطوبت درمان.</li> <li>* دمای پایین یا زیر صفر در طول درمان.</li> <li>* عملیات حرارتی در بخار کم فشار.</li> <li>* عملیات حرارتی در میدان مایکروویو.</li> </ul>
۳	سرویس	<ul style="list-style-type: none"> <li>* رطوبت.</li> <li>* سن.</li> <li>روغن کاری با روغن معدنی</li> </ul>

تکثیر ترک در بتن توسط مکانیک شکستگی تجزیه و تحلیل می شود. هدف اصلی آن تعیین این است که آیا یک عنصر از یک شکل داده شده با یک حالت داده شده از ترک اولیه و تحت یک بار داده شده هنوز هم می تواند مورد استفاده قرار گیرد. به عنوان بخشی از مکانیک شکستگی، روش توسعه ترک در مواد، جهت انتشار ترک، تأثیر محیط بر فرآیند شکستگی و رفتار ساختارهای حاوی نقص نیز مورد تجزیه و تحلیل قرار می گیرد [۱۰۲،۱۰۳].

## ۲.۲. علل آسیب و ترک در بتن

ترک هایی که در بتن رخ می دهد می تواند با توجه به معیارهای مختلف طبقه بندی شود [۱۰۴،۱۰۵،۱۰۶،۱۰۷،۱۰۸]:

- علت ترک خوردگی؛
- موقعیت در سازه؛
- عرض؛
- ترتیب؛
- امکان پذیرش عنصر آسیب دیده برای استفاده؛
- روش های مشاهده.

بر اساس طبقه بندی فوق می توان نتیجه گرفت که برای تجزیه و تحلیل کامل نقص در سازه بتنی باید علل آسیب، محل آسیب و نوع و اندازه ترک ها را دانست. چنین اطلاعاتی در تعیین عوامل مسئول قطع در مواد و همچنین در انتخاب یک تکنیک تعمیر موثر برای عنصر آسیب دیده مفید است. با دانستن علت شروع آسیب در عنصر بتنی، کاربر این مرکز قادر به مقابله با تخریب بیشتر آن از طریق تقویت یا بازسازی است. در غیر این صورت، توسعه تدریجی آسیب ممکن است منجر به شکست در طول زمان یا حتی یک فاجعه ساختمانی شود [۱۰۸]. دو نوع علت آسیب در عناصر بتنی و بتن مسلح وجود دارد، اگرچه آنها متنوع هستند و اغلب تعیین آنها دشوار است:

الف) نقص های اولیه-ناشی از خواص طبیعی مواد یا از خطاهای طراحی و اجرا.



# ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

ISSN ۲۹۸۰-۷۷۸۶

(ب) نقص های ثانویه-در طول بهره برداری رخ می دهد.

گروه تعیین کننده هایی که باعث ایجاد نقص های اولیه می شوند شامل موارد زیر است::

الف) در گروه علل تشکیل ترک مواد طبیعی:

- تنش های حرارتی اولیه که در طی چند ساعت اول پس از تشکیل عنصر بتنی رخ می دهد;
- انقباض بتن ناشی از تبدیل فیزیکی-شیمیایی اجزای سیمان;
- ناهمگونی مواد.

(ب) در گروه علل ترک های مربوط به تقویت اعمال شده:

- وضعیت سطح تقویت;
- چسبندگی تقویت کننده اعمال شده;
- روش توزیع درج ها در مقطع عنصر;
- قطر تقویت;
- فاصله درج ها از لبه عنصر.

(ج) در گروه علل ترک در نتیجه خطاهای طراحی:

- فرضیه های طراحی ناقص برای شرایط کاری ساختار;
- بارهای به اشتباه توسط طراحان فرض شده است ، به عنوان مثال ، حذف بارهای دما;
- شرایط نامناسب فرض شده برای اجرای ساخت و ساز;
- دانش ناکافی طراحان;
- خطاهای محاسبه در طول توسعه پروژه;
- غفلت نویسندگان پروژه.

(د) در گروه علل ترک در نتیجه خطاهای تکنولوژیکی و کاری:

- مقاومت ناکافی مواد و محصولات;
- کیفیت پایین مونتاژ و اتصالات ساختاری;
- وقفه های تکنولوژیکی گسترده در تخمگذار لایه های متوالی مخلوط بتن;
- فشردگی سازی ضعیف و لرزش ناکافی بتن در مکان های وقفه های تکنولوژیکی;
- پوشش بیش از حد کم عمق و متخلخل از تقویت بتن;
- انحرافات از پروژه در حین اجرا;

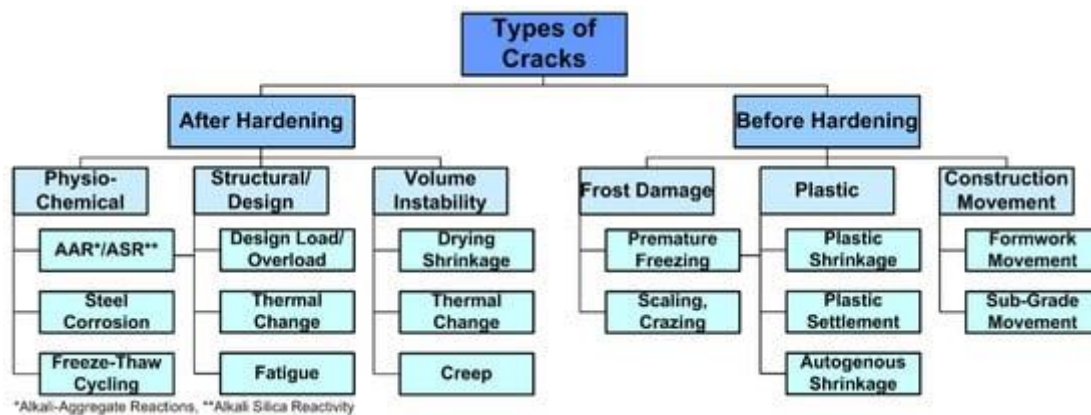


- مدارک و دانش کافی پیمانکاران؛
- ناکافی بودن نظارت و همکاری با طراح؛
- غفلت از پیمانکاران.

در این گروه از علل، عوامل ایجاد کننده ترک در زیر نقطه (a) به ویژه مهم هستند زیرا با ترک های ناشی از تغییرات رخ داده در ترکیب عمدتاً در ابتدای تشکیل ساختار مرتبط هستند. ارائه مفصل علل تشکیل ترک در عناصر بتنی در روند پیشرفت بلوغ مخلوط بتن و بتن را می توان در [۱۰۷،۱۰۸،۱۰۹] یافت. در این مطالعات و سایر مطالعات، مراحل اولیه تشکیل ترک بسته به مرحله توسعه ساختار آن [۱۰۹،۱۱۰،۱۱۱] در نظر گرفته شده است. یادآور می شود که دوام سازه های بتنی به دلیل احتمال ترک خوردگی به ویژه در مورد بتن های عظیم یا با مقاومت بالا در مراحل اولیه بتن ریزی به شدت در معرض خطر است [۱۱۲،۱۱۳،۱۱۴].

با این حال، همانطور که نتایج آزمایشات در [۱۱۵،۱۱۶] نشان می دهد، می توان اثرات منفی آسیب را در مرحله اولیه پخت چنین بتن هایی از طریق جایگزینی جزئی اتصال دهنده سیمان با خاکستر مگس یا استفاده از سنگدانه های سبک وزن محدود کرد. با توجه به کاهش گرمای هیدراتاسیون در کامپوزیت ها با ترکیب اتصال دهنده اصلاح شده [۱۱۷]، خطر شروع میکرو ترک ناشی از یک فرآیند پخت بسیار آگروتروم در سازه های عظیم نیز کاهش می یابد [۱۱۸].

بر اساس [۱۱۹]، شکل ۳ لیستی خلاصه از برخی از انواع رایج ترک ها را ارائه می دهد که با توجه به سن آنها متمایز می شوند، یعنی اینکه قبل یا بعد از سخت شدن ظاهر می شوند. طبقه بندی ترک هایی که در کامپوزیت های سیمانی رخ می دهد، همراه با دلایل تشکیل و زمان تقریبی وقوع یک نوع ترک داده شده، در [۱۲۰] نیز ارائه شده است.



شکل ۳. علل شایع ترک خوردگی در سازه های بتنی (طبق [۱۱۹]).

گروه تعیین کننده هایی که باعث ایجاد نقص ثانویه می شوند شامل موارد زیر است:

الف) خطاها در هنگام استفاده از امکانات:

- بارهای بیش از حد و ناکافی در رابطه با فرضیات طراحی؛



# ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

ISSN ۲۹۸۰-۷۷۸۶

- تغییر در نمودار استاتیک یا هدف از تاسیسات؛
- حفاظت ناکافی از ساختار در برابر تاثیر محیط زیست؛
- ناکافی بودن نظارت فنی بر عملیات؛
- دانش کافی از کاربران.

## ب) خطاهای طراحی:

- پایه و اساس نامناسب ساختمان؛
- تعداد کافی از اتصالات انبساط؛
- عایق مرطوب به اشتباه طراحی شده است؛
- طراحی نادرست سقف و تراس؛
- خطاها در ابعاد ساختار.

## ج) خطاهای اجرایی:

- استفاده از مواد با خواص بدتر از طراحی شده؛
- اجرای بی توجهی به آثار؛
- عدم رعایت تکنولوژی صحیح کار، به عنوان مثال ، انتخاب نامناسب تکنولوژی برای کار در دمای پایین.

## د) تاثیر تهاجمی محیط خارجی:

- فرسایش و خوردگی بتن؛
- تاثیر رطوبت؛
- محل سکونت زمینی؛
- شوک ها و ارتعاشات؛
- فشار باد جانبی بر دیوارها و سقف ها؛
- بارش برف روی سقف و تاثیر عوامل بیولوژیکی

## ه) بارهای استثنایی:

- بار باد و برف بیش از حد؛
- انفجار گاز و شکست های تکنولوژیکی؛
- آتش سوزی و آسیب تصادفی؛
- بارهای لرزه ای؛

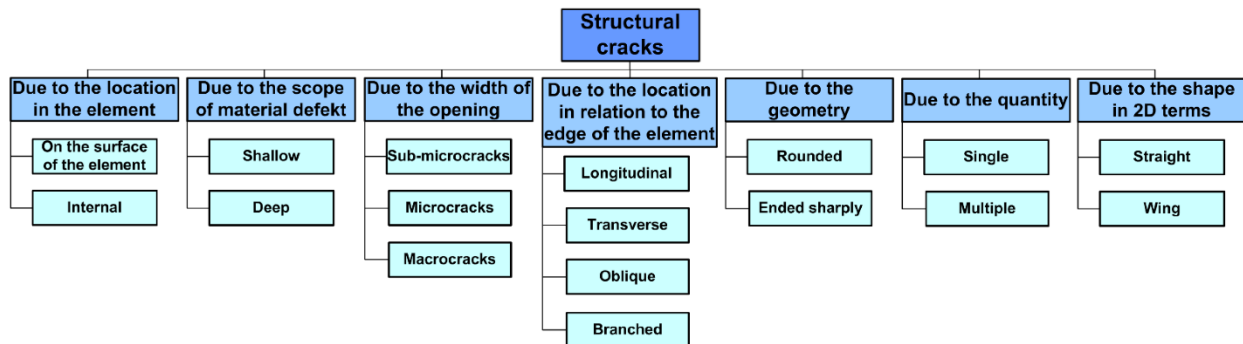
- طوفان ها؛
- سیل.

## ۲,۳. انواع ریزگردها و ترک ها

کاهش قدرت در مواد شکننده مانند بتن با نقص های مسطح و فضایی در میکروساختار آنها همراه است [۱۲۰]. علاوه بر این، ساختار و درجه توسعه یک الگوی ترک خوردگی تأثیر کلیدی بر دوام کامپوزیت های سیمان دارد [۱۲۱]. از سوی دیگر، می توان با تجزیه و تحلیل محل آن و همچنین شکل و مسیر انتشار ترک در عناصر ساختاری تشخیص داد که کدام استرس باعث آسیب شده است. با این دانش، می توان به سرعت عاملی را که باعث روند مخرب در ساختار شده است تعیین کرد و اقدامات مناسب را برای به حداقل رساندن یا کاهش هرگونه اثرات منفی بیشتر ناشی از وضعیت انجام داد [۱۲۵، ۱۲۴، ۱۲۳، ۱۲۲]. بنابراین، یک مرور کلی از شایع ترین ترک های رخ داده در هر دو بتن و سازه های بتنی تقویت شده در زیر خلاصه شده است.

## ۲,۳,۱. ترک در سازه بتنی

در تجزیه و تحلیل ترک های موجود در کامپوزیت های بتنی، مهم است که ساختار، شکل و تعداد ترک ها را بدانید. اولین ترک هایی که در بتن رخ می دهد را می توان با توجه به معیارهای داده شده در شکل ۴ تقسیم کرد.



شکل ۴. شکستن ترک های سازه ای در بتن

علاوه بر این، علاوه بر تقسیم ترک های ساختاری ارائه شده در شکل ۴، انواع زیر ترک ها را می توان با توجه به وقوع پدیده های پیچیده فیزیکی در تماس سنگدانه درشت با خمیر تشخیص داد: ترک های گشاد، یعنی آنهایی که در نتیجه بارهای خارجی باز می شوند، زبری سطح سنگدانه یا فشار آب داخلی؛ ترک هایی با اصطکاک تماس هنگام لغزش لبه های فشرده ترک؛ ترک هایی با لایه منسجم بین لبه های ترک؛ ترک هایی با به اصطلاح "منطقه فرآیند شکستگی" در بالای کلان ترک ناشی از توسعه تغییر شکل های پلاستیکی یا ترتیبات میکرو ترک. همچنین باید اضافه کرد که جدا از چند تقسیم مشخصه فوق ریز ترک ها و ترک هایی که معیارهای مختلف صلاحیت آنها در نظر گرفته شده است (شکل ۴)، تقسیمات دیگری از این نقص های بتنی نیز وجود دارد که در برخی از



# ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

ISSN ۲۹۸۰-۷۷۸۶

کارهای تجربی شرح داده شده است. یک توصیف جالب و تقسیم میکرو ترک ها به سه دسته و ترک ها به چهار دسته بر اساس تحقیقات با استفاده از توموگرافی اشعه ایکس (بخش ۳ را ببینید) [۱۲۶] بود.

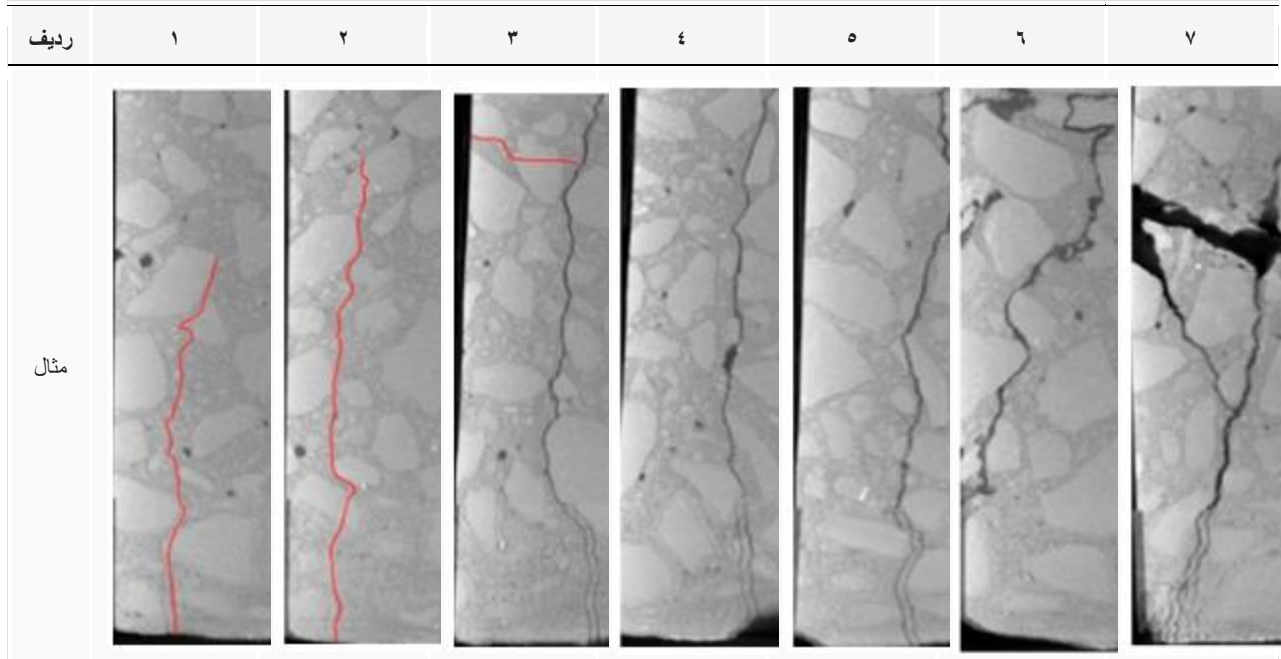
از آنجا که اولین آسیب در ساختار بتنی معمولا در ضعیف ترین منطقه آن، یعنی منطقه انتقال بین سطحی (ITZ) بین سنگدانه و خمیر سیمان رخ می دهد، نویسندگان هنگام ارزیابی آسیب در کامپوزیت ها بر روی این منطقه در تجزیه و تحلیل خود تمرکز کردند. طبقه بندی انواع ریزگردها و ترکها با توجه به نویسندگان [۱۲۶] در جدول ۲ ارائه شده است. علاوه بر این، جدول ۳ عکس های نمونه ای از هر نوع ترک طبقه بندی شده را ارائه می دهد که با داده های جدول ۲ [۱۲۶] ارتباط دارد.

جدول ۲. طبقه بندی ترک [۱۲۶].

ردیف	نوع ترک	ویژگی ها
۱	میکرو ترک نوع I	ترک ها به طور کامل در امتداد طرح کلی سنگ های درشت ایجاد شدند.
۲	میکرو ترک نوع II	ترک هایی در امتداد طرح کلی سنگ های درشت ایجاد شد اما پدیده ای وجود داشت که در آن چتری ها از گوشه های سنگ های درشت عبور می کردند.
۳	میکرو ترک نوع III	ترک ها در امتداد طرح سنگ شکن های خشن ایجاد شدند اما پدیده ای وجود داشت که در آن شکاف از طریق مرکز سنگ شکن های خشن قطع شد.
۴	نوع I - ترک	جهت توسعه ترک به طور کامل در امتداد طرح کلی سنگ های درشت بود و ترک ها نسبتا باریک بودند.
۵	ترک نوع II	جهت توسعه ترک ها اساسا در امتداد طرح کلی سنگ های درشت بود اما پدیده ای وجود داشت که در آن ترک ها از گوشه سنگ های درشت عبور می کردند و ترک ها نسبتا باریک بودند.
۶	ترک نوع III	جهت توسعه ترک ها به طور کامل در امتداد طرح کلی سنگ های درشت نبود. ترک ها مستقیما از وسط سنگ شکن درشت عبور می کردند و ترک ها ضخیم تر بودند.
۷	ترک نوع IV	توسعه ترک ها از طرح کلی سنگ های خام پیروی کرد و باعث تکه تکه شدن در منطقه ای شد که سنگ های ریز جمع می شدند. تکه تکه شدن عمدتا به شکل نوار یا بلوک بود.

جدول ۳. نمونه هایی از انواع خاص ترک ها [۱۲۶].

ردیف	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
مدل های ترک	Type-I microcrack	Type-II microcrack	Type-III microcrack	Type-I crack	Type-II crack	Type-III crack	Type-IV crack



۲،۴. ترک در سازه های بتن مسلح

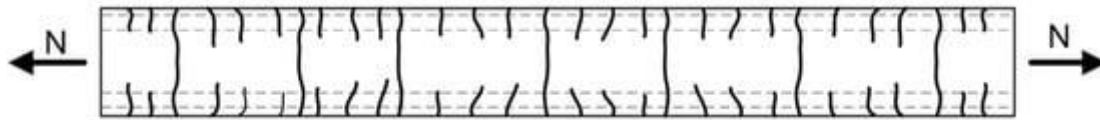
علاوه بر انواع مختلف ترک های موجود در بتن ذکر شده در بخش ۴،۱ که علل تشکیل آنها در بخش ۳ مشخص شده است ، گروه دیگری از ترک ها در ارتباط با نوع اقدامات رخ داده در ساختار متمایز می شوند. دانش مورفولوژی مشخصه ترک ها ، مرتبط با نوع غالب بار ، در تشخیص علل احتمالی ترک در عناصر ساختاری اساسی است. این اجازه می دهد تا تعیین شود که آیا ترک ها در ساختار نتیجه بارهایی است که نشان دهنده وجود تنش های کششی، برش یا پیچشی در بخش های متقاطع است [۱۳۲،۱۳۱،۱۳۰،۱۲۹،۱۲۸،۱۲۷]. علاوه بر این، هر نوع استرس با تشکیل میکرو ترک های مشخصه در ساختار مواد [۱۳۳،۱۳۴،۱۳۵] مرتبط است. بنابراین، ترک در عناصر ساختاری ناشی از چهار مورد معمول بارهای فعلی مشخص شده و به صورت گرافیکی در زیر ارائه شده است [۱۳۵]. بر اساس تجزیه و تحلیل های میکروسکوپی ، اشکال مشخصه میکروکراک های مربوط به ماکروکراک های قابل مشاهده در سطح بتن نیز نشان داده شده است.

۲،۴،۱. تصویر ماکروسکوپی ترک در عناصر بتن مسلح

الف) ترک های ناشی از تنش:

ترک های ناشی از تنش محوری یا تنش بر روی عجیب و غریب کوچک عمود بر جهت نیرو ایجاد می شود و باعث ایجاد تنش در عنصر بتن مسلح می شود. چنین ترک هایی ساخت و ساز را "از طریق" سوراخ می کند. گاهی اوقات ، ممکن است جهت کمی شیب دار نیز داشته باشند (شکل ۵). ترک های این نوع اغلب نتیجه بارهای عملیاتی یا تغییر شکل انقباض حرارتی ساختار است [۱۳۶]. در نتیجه ، نیروهای کششی (N) در مقاطع عناصر بتن مسلح و در نتیجه ترک های مشخصه بوجود می آیند (شکل ۵). تنش های

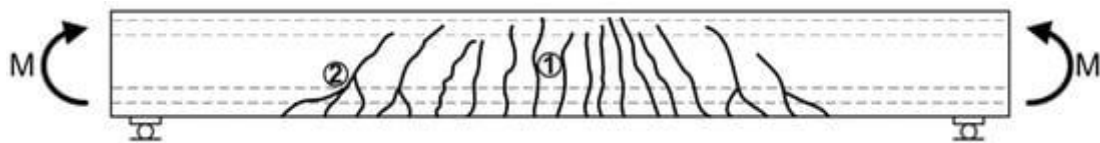
محوری یا عجیب و غریب در ساختارهایی مانند نوارهای خریپاهای بتنی تقویت شده پایین، رشته های بتنی تقویت شده و نوارهای میانی دیوارهای استوانه ای مخازن مایع یا سیلوها رخ می دهد.



شکل ۵. میکرو ترک ها به دلیل تنش؛ نیروی محوری N.

(ب) ترک های ناشی از خم شدن:

ترک های ناشی از خم شدن، که همچنین باعث تنش های کششی در نقاط شروع آنها می شود، فقط در این قسمت از مقطع بتن بوجود می آیند و، تکثیر، تمایل دارند قبل از منطقه تنش های کششی صفر رخ دهند [۱۳۷] (شکل ۶). در عناصر به شدت تقویت شده، علیرغم ترک های عمودی معمولی یا ترک های کمی خمیده (۱)، ترک های جمعی (۲) نیز می توانند مشاهده شوند (شکل ۶).

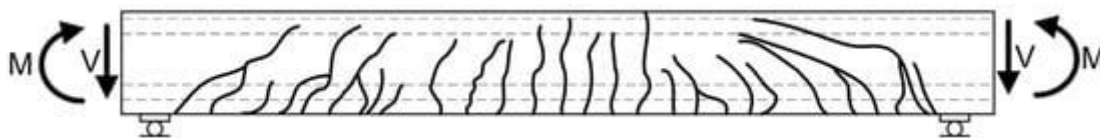


شکل ۶. ماکرو ترک ها به دلیل خم شدن؛ ۱- ترک های منفرد، ۲- ترک های جمعی، لحظه خم شدن M.

(ج) ترک های ناشی از برش:

ترک های ناشی از برش ناشی از تنش های کششی اصلی شیب دار است. وقوع آنها ناشی از وقوع نیروهای عرضی است. از آنجا که برش یک پدیده پیچیده است که در نتیجه برخورد متقابل نیروی عرضی (V) و لحظه خم شدن (M) رخ می دهد، الگوی ترک که در سطح عنصر بتن مسلح رخ می دهد همیشه به هر یک از این نیروهای داخلی در فرآیند ترک بتن بستگی دارد.

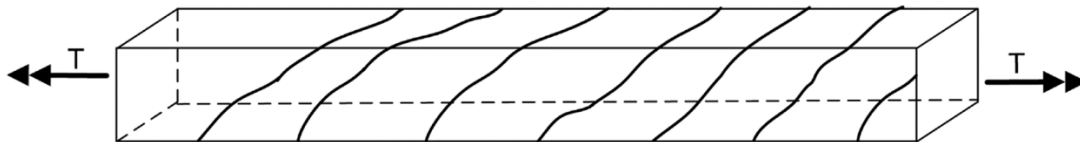
به همین دلیل، در منطقه میانی عنصر، جایی که تأثیر نیروهای عرضی محدود است و تلاش بخش ها توسط لحظه خم شدن تعیین می شود، ترک هایی عمود بر محور پرتو وجود دارد (شکل ۷). با این حال، در منطقه پشتیبانی، جایی که نیروی عرضی نقش غالب در برش دارد، ترک هایی وجود دارد که به محور طولی میل می کنند (به اصطلاح ترک های مورب) [۱۳۸] (شکل ۷). اغلب، چنین ترک هایی به دلیل خم شدن از ترک های تشکیل شده قبلی ایجاد می شوند، همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۷. ماکرو ترک ها به دلیل برش؛ M- همانطور که در شکل ۵، نیروی برش V است.

(د) ترک های ناشی از پیچ خوردگی:

در مورد پیچش عناصر بتن مسلح ، که یک گروه نسبتا کوچک از سازه های بتنی مسلح هستند (مانند تیرهای کف لبه ، تیرهای حلقه ای تخته بالکن ، قاب های فضایی ، پله های مارپیچی و قوس های بتنی مسلح که عمود بر سطح آنها بارگذاری شده اند [۱۳۹،۱۴۰]) ، به دلیل لحظه پیچشی ( $T$ ) ، تنش برشی ( $tT$ ) در مقاطع عناصر ایجاد می شود. این تنش ها ممکن است باعث ایجاد ترک هایی شوند که شکل مشخصی شبیه به یک هلیکس دارند ، که در آن خط در زاویه ۴۵ درجه به محور عنصر پیچشی متمایل است. ترک هایی با این نوع استرس به طور مشخص در تمام سطوح عنصر بتن مسلح رخ می دهد. با این حال ، شروع آنها از سطح جانبی در امتداد لبه طولانی تر قطعه متقاطع عنصر شروع می شود [۱۴۱]. با افزایش بار ، ترک ها در امتداد لبه کوتاه تر روی سطح ظاهر می شوند. در مرحله بعدی توسعه ترک ، آنها همچنین در لبه طولانی تر مخالف بوجود می آیند. در مرحله نهایی توسعه ترک ها از پیچش ، آنها ادغام می شوند به طوری که شبکه ترک قبل از تخریب عنصر ، تمام سطوح نوار را پوشش می دهد [۱۴۲] (شکل ۸). این به تمایز بین مواردی که ترک ها در اثر برش در ساختار ایجاد می شوند و مواردی که ترک ها در اثر پیچش ایجاد می شوند کمک می کند [۱۴۳،۱۴۴]. همانطور که در شکل ۷ نشان داده شده است، در مورد برش، ترک های مشابه شکل (به عنوان مثال، در برخی از زاویه به محور طولی عنصر) تنها در سطح جانبی پرتو رخ می دهد.



شکل ۸. ترک های ماکرو به دلیل پیچش ؛ لحظه torsional-t.

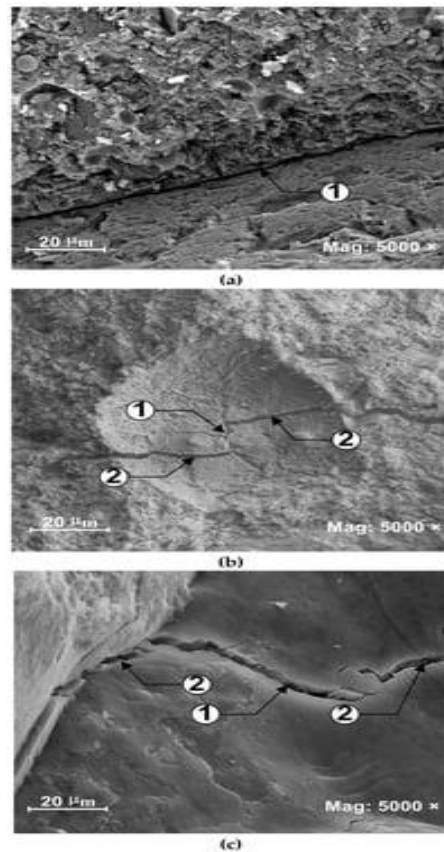
(ه) خلاصه و مقایسه مورفولوژی ترک ماکروسکوپی در عناصر بتن مسلح:

لازم به ذکر است که ترک در عناصر بتن مسلح زمانی رخ می دهد که بتن به حد مقاومت کششی برسد. بسته به نوع ساختار بتن مسلح، آنها در بخش ها و مناطق خاصی از ساخت و ساز وجود دارند. ترک ها در عناصر ساختاری ممکن است هم از نظر شکل و هم از نظر جهت انتشار متفاوت باشند و عمدتا به نوع تعامل ایجاد کننده نوع خاصی از ترک مربوط می شوند. چهار نوع تعاملات اساسی در سازه های بتنی تقویت شده وجود دارد که منجر به ترک هایی می شود که از نظر شکل، مکان و مسیرهای تکثیر با یکدیگر متفاوت هستند.

۲،۴،۲. ارتباط ویژگی های میکرو ترک ها با نوع استرس های رخ داده در عنصر آسیب دیده

جدا از الگوی مشخص ترک ها بر روی سطح عناصر بتن مسلح که تقریبا به طور واضح نشان می دهد کدام نوع بار باعث تشکیل آنها شده است ، نوع تنش هایی که منجر به تخریب بتن می شود نیز می تواند بر اساس ظاهر ریزساختار نقص های آن تشخیص داده

شود. شکل ۹ ترتیبات مشخصه میکرو ترک ها را نشان می دهد که با موارد آسیب ماکروسکوپی ناشی از انواع اساسی استرس ها مطابقت دارد (شکل ۵ ، شکل ۶ ، شکل ۷ و شکل ۸). ترک های ارائه شده عمدتاً مربوط به منطقه فاز ITZ است، یعنی ضعیف ترین و اصلی ترین مکان شروع میکرو ترک در کامپوزیت بتن، همانطور که در بخش ۱، ۴، ۲ ذکر شده است. به منظور ارائه تفاوت بین انواع مختلف میکرو ترک ها تا حد امکان دقیق، عکس های انتخاب شده دارای مقیاس و بزرگنمایی یکسان هستند.



شکل ۹. ریز ترک های ایجاد شده در سازه های بتنی ناشی از تنش ها: (الف) تنش کششی ، (ب) تنش برشی ، (ج) تنش پیچشی ؛ ۱- ترک مستقیم ، ۲- ترک مورب.

در ساختارهایی که تنش غالب است، ترک ها معمولاً شکل مستقیم دارند. آنها اغلب در منطقه ITZ ظاهر می شوند و به ترتیب در طول کل دانه های جمع شده رشد می کنند (شکل ۹a). با افزایش بار ، آنها ممکن است به ساختار ماتریس سیمان یا به عمق یک گنجاندن گسترش یابند، همانطور که در مورد ماتریس با قدرت بیشتری نسبت به سنگدانه درشت مانند بتن های با عملکرد بالا مشخص می شود [۱۴۵]. همانند رویکرد ماکروسکوپی، استرس برشی باعث منحنی شدن ترک های مستقیم می شود و همچنین باعث می شود که منحنی ها در انتهای میکروکراک ها شروع به ظاهر شدن کنند و جهت انتشار آنها نیز تغییر کند. در قله های میکرو ترک های ساده ، بال ها آغاز می شوند (شکل ۹b). بسته به مقدار بارهای فعلی ، بالها ممکن است با زاویه بیشتر یا کمتر به قسمت مستقیم میکرو ترک منحرف شوند. تغییر در هر دو مورفولوژی و مسیر چنین میکرو ترک ها ممکن است باعث شود که دانه





# ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

ISSN ۲۹۸۰-۷۷۸۶

های جمع شده انسجام محلی خود را با سطح ماتریس از دست بدهند ، که ممکن است منجر به جدا شدن آنها از سطح آن شود. سپس حفره ها در ساختار بتنی تشکیل می شوند. شکل مشخصه میکروکراک بال ، که نتیجه برش است ، در جایی مشاهده می شود که دانه کل از خمیر خارج می شود (شکل b۹). به نوبه خود، پیچش که در رویکرد ماکروسکوپی باعث ایجاد ترک های فضایی بر روی چندین سطح عنصر ساختاری می شود (شکل ۸) ، شکل ترک های کوچک در ساختار بتنی را نیز تغییر می دهد. در نتیجه وضعیت استرس موجود ، نوک بال ها پیچ خورده است، اغلب با آسیب های میکرو محلی اضافی در نقاط غلظت استرس ، یعنی در مکان هایی که بخش های مستقیم میکرو ترک ها منحنی هستند (شکل c۹) ترکیب می شود. سایر ترتیبات میکرو ترک ها به دلیل پیچیدگی که مشاهده شده است شامل میکرو ترک هایی است که از مرکز نمونه به سمت لبه بیرونی آن به صورت شعاعی پخش می شوند [۱۴۶] و آسیب به شکل نیم دایره [۱۴۷] دارند.

## ۳. روش پژوهش

۳،۱. تشخیص و مشاهده ترک ها و ریزگردها در بتن

۳،۱،۱. هسته اصلی مشکل در زمینه تحقیقات ترک بتن

تصادفی بودن چیدمان هندسی، اندازه و شکل دانه های پرکننده کامپوزیت بتن و تنوع در خواص مکانیکی و فیزیکی آن—هم در رابطه با دانه های مجاور و هم ماتریس سیمان—تجزیه و تحلیل فرآیند ترک بتن را یک کار دشوار می کند. از این رو ، روند تشکیل و توسعه ریزگردها و ترک ها در بتن، برای مدت طولانی، تنها بر اساس علائم و اثرات خارجی ، مانند تغییر شکل پذیری تحت بار انجام شده است. با توسعه تکنیک های اندازه گیری متعدد، امکان محدود نشدن به مقادیر متوسط خاص (به عنوان مثال ، استرس ها ، تغییر شکل ها) وجود دارد، بلکه به جای آن به دنبال علل تشکیل و انتشار آسیب به دلیل اینکه دیگر محدود به تجزیه و تحلیل اثرات فرآیندهای تخریب رخ داده در بتن نیست. به همین دلیل، در چند دهه گذشته توسعه سریع تکنیک ها و دستگاه هایی برای تشخیص ریزگردها و ارزیابی تکثیر آنها وجود داشته است [۱۴۸]. بسته به مقیاس مرجع اتخاذ شده ، دقت مشاهدات و اهداف تحقیق فرض شده، روش های مختلفی در دسترس است که می تواند برای تشخیص و تجزیه و تحلیل ترک ها و میکرو ترک ها در بتن استفاده شود. بنابراین، ویژگی ها و مزایا و معایب متداول ترین روش ها و دستگاه های مورد استفاده برای محلی سازی و تجزیه و تحلیل در زیر آورده شده است: ترک در سطح بتن ؛ ترک های کوچک واقع در داخل ساختار بتن.

## ۳،۲. تشخیص ترک های سطحی

ابزارهای شناسایی و مشاهده ترک هایی که در سطح و در ریزساختار کامپوزیت ها با ماتریس های سیمانی رخ می دهد از دهه ۱۹۶۰ به طور متوالی توسعه یافته است. با این حال، در سال های اخیر، به دلیل وضعیت نگران کننده وخیم زیرساخت های بتنی جهان، تأکید ویژه ای بر توسعه روش های غیر مخرب که می تواند در تشخیص سازه ها و همچنین در تشخیص و تجزیه و تحلیل میزان نقص آنها مورد استفاده قرار گیرد [۱۴۹]. برای این منظور، تلاش هایی برای تطبیق تکنیک های غیر مخرب جدید برای ارزیابی



# ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

ISSN ۲۹۸۰-۷۷۸۶

ساختار موادی که قبلا به طور موثر در پزشکی، صنعت هوانوردی، ژئوتکنیک و تحقیقات فلزی مورد استفاده قرار گرفته بود، انجام شد [۱۵۰].

در صورت بروز آسیب در سطح عناصر بتنی، عرض از اهمیت ویژه ای برخوردار است زیرا ترک های با عرض زیاد می توانند سفتی، استحکام و سفتی ساختار را به میزان قابل توجهی کاهش دهند. این به نوبه خود می تواند باعث خوردگی تدریجی میلله های تقویت شود. به همین دلیل، عرض باز شدن چنین ترک هایی معمولا در محدوده ۰,۲-۰,۴ میلی متر استاندارد می شود. با این حال، برای سازه هایی که در محیط های تهاجمی کار می کنند و آنهایی که نیاز به تنگی دارند، هنجار حد ترک ها تنها ۰,۱ میلی متر است [۱۵۱]. علاوه بر این، روش های تشخیصی مورد استفاده برای ارزیابی ترک های سطحی و زیرزمینی دارای طیف گسترده ای از ابزارهای اندازه گیری مختلف تا حدی استاندارد شده است. تکنیک های مورد استفاده را می توان به طور کلی به غیر مخرب، نیمه غیر مخرب و مخرب تقسیم کرد، در حالی که رایج ترین آنها تست های بصری، روش اولتراسونیک و روش های مدرن تری است که اخیرا در تجزیه و تحلیل ترک های سطحی استفاده می شود، یعنی: روش های ترموگرافی؛ همبستگی تصویر دیجیتال (dic).

شرح روش ترموگرافی، با نمونه ای از یک دوربین تصویربرداری حرارتی که برای تجزیه و تحلیل ترک های نزدیک به سطح در یک عنصر خم شده استفاده می شود، در [۱۵۲، ۱۵۳، ۱۵۴] ارائه شده است. این روش شامل اسکن اولیه سطح بتن توسط دوربین مادون قرمز در زمان حداکثر تبادل گرما بین ساختار و محیط پس از نور مستقیم خورشید است. اطلاعات حاصل از میدان دما (نوسانات محلی) و همچنین منحنی خنک کننده (سرعت متفاوت خنک کننده نسبت به مناطق همسایه)، نقص های زیر سطحی را نشان می دهد [۱۵۲]. این تکنیک به ویژه در تشخیص ترک ها در مناطق "دردساز" موفق است. علاوه بر این، این روش می تواند در ارزیابی لایه برداری بتن در برخی از سازه های بتنی [۱۵۵] و همچنین در تشخیص آسیب در مواد کامپوزیت [۱۵۶] مورد استفاده قرار گیرد. اخیرا روش های جدیدی برای آزمایش نقص در ساختمان ها ظاهر شده است، مانند ترموگرافی با فاصله زمانی [۱۵۷] موازی با تکنیک ترموگرافی سنتی. همچنین باید توجه داشت که در ادبیات می توان نمونه های متعددی از استفاده از روش ترموگرافی را در ارزیابی نقص چسبندگی ناشی از ایجاد ترک در بتن تقویت شده با پارچه های CFRP یافت [۱۵۸]. این تکنیک همچنین برای این نوع آزمایش در ارتباط با سایر روش های غیر مخرب استفاده شده است [۱۵۹]. مزایای استفاده از این روش برای پیدا کردن آسیب نیز در هنگام تشخیص ترک در سقف [۱۶۰] و عناصر زیرساخت جاده [۱۶۱] مشاهده شد.

از سوی دیگر، تکنیک DIC برای اندازه گیری بدون تماس جابجایی ها و ارزیابی ترک در عناصر بتنی مسطح و فضایی تحت بار طراحی شده است [۱۶۲]. این یک روش نوری غیر تهاجمی است که شامل گرفتن مجموعه ای از عکس ها از منطقه تجزیه و تحلیل شده ساختار آزمایش شده تحت بارهای مختلف و سپس تجزیه و تحلیل عکس های گرفته شده است. چنین فعالیت هایی با هدف محاسبه جابجایی نقاط انتخاب شده منطقه تجزیه و تحلیل شده [۴۵، ۱۶۳، ۱۶۴] انجام می شود. سیستم اندازه گیری در تکنیک DIC شامل مجموعه ای از دوربین های ضبط تغییرات در شکل شی مورد بررسی و یک کامپیوتر مناسب و برنامه ریزی شده است که تصاویر ضبط شده را ذخیره و پردازش می کند. بسته به پیکربندی، یعنی تعداد و سرعت دوربین ها، می توان از سیستم برای تجزیه و تحلیل میدان های جابجایی و تغییر شکل عناصر مسطح یا فضایی بارگذاری شده به صورت استاتیک یا پویا استفاده کرد. با تشکر از تجزیه و تحلیل عکس های گرفته شده همراه با روند بارگیری در حال پیشرفت، می توان ترک های موجود در عناصر بتنی



# ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

ISSN ۲۹۸۰-۷۷۸۶

تقویت نشده و تقویت شده را شناسایی کرد. این تکنیک پیشرفته و بسیار دقیق تشخیص ماکروکرک ها نیز در مطالعه فرآیندهای میکرو ترک در ساختار بتنی مفید است [۱۶۵]. به لطف دقت استثنایی این روش ، می توان فرآیندهای ترک را در بتن هایی که نه تنها در معرض بارهای مکانیکی [۱۶۶] قرار دارند ، بلکه در برابر انواع دیگر بارها ، به عنوان مثال بارهای حرارتی [۱۶۷] تجزیه و تحلیل کرد. ویژگی های منحصر به فرد تکنیک DIC همچنین امکان ردیابی دقیق توسعه ریزگردها و ترک ها در ساختار بتنی را فراهم می کند [۱۶۸].

طبق [۱۶۹]، تکنیک DIC همچنین امکان تجسم و کمیت خواص شکستگی بتن مسلح را فراهم می کند. علاوه بر این ، تکنیک DIC به عنوان یک وسیله موثر برای اندازه گیری جابجایی باز شدن ترک [۱۷۰، ۱۷۱] یافت شد. از سوی دیگر ، روش ردیابی نوک ترک (CTT) که توسط [۱۷۲] توسعه یافته است ، به رغم این واقعیت که مسیر پیچیده و پیچیده آن در داخل ساختار آسیب دیده مواد قرار دارد ، به تعیین طول کل بسیار تقریبی میکرو ترک ها کمک می کند. چنین مطالعاتی اجازه می دهد تا نتیجه گیری های بعدی در مورد تفاوت بین رفتار انواع مختلف مواد در روند آسیب آنها انجام شود [۱۷۳]. بر اساس داده های فوق، جدول ۴ مقایسه ای از مزایا و معایب روش تصویربرداری حرارتی و روش DIC [۱۷۴، ۱۷۵] را ارائه می دهد.

جدول ۴. مقایسه مزایا و معایب روش های ترموگرافی و DIC.

معایب	مزایا	روش
<ul style="list-style-type: none"> <li>* مدل محاسبه ریاضی برای تعیین عمق نقص برای قطعات ساختاری</li> <li>، عمدتاً در رابطه با اشکال پیچیده مورد نیاز است؛</li> <li>* عمق تشخیص به اندازه کافی عمیق نیست</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* سریع</li> <li>* اندازه گیری بدون تماس؛</li> <li>* منطقه تشخیص بزرگ؛</li> <li>* نتایج بصری.</li> </ul>	تصویربرداری حرارتی
<ul style="list-style-type: none"> <li>• مستعد اختلالات ناشی از عوامل خارجی است ، به عنوان مثال ، ارتعاشات؛</li> <li>• نیاز به آماده سازی سطح نمونه از طریق اسپری و یک روش کالیبراسیون کامل دارد؛</li> <li>* محاسبات با شدت بالا و زمان بر در حالت دقیق؛</li> <li>• نیاز به توجه بیشتر و بیشتر در طول تحقیقات در مورد سازه های بتنی آسیب دیده ، به عنوان مثال ، در این مناطق ، نقشه تنش-فشار در برخی موارد غیر مداوم است ، که باعث عدم دقت اضافی در داده های به دست آمده می شود.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* اندازه گیری بدون تماس؛</li> <li>* امکان مطالعه فرآیندهای ترک و شکستگی بسیار دقیق در عناصر بتنی سازه؛</li> <li>• میدان کامل تغییر شکل را بدست می آورد؛</li> <li>• تصویر گسترده عملکرد ساختار را ارزیابی می کند؛</li> <li>* داده های قابل اعتماد در مقیاس کوچک و بزرگ را ارائه می دهد؛</li> <li>• قابل استفاده در تست های استاتیکی و خستگی؛</li> <li>* امکان به دست آوردن داده های استرس زا در طول کل منطقه مورد مطالعه.</li> </ul>	DIC

## ۴. تشخیص ریزگردها ساختاری

### ۴.۱. تقسیم بندی کلی روش های تشخیصی مورد استفاده



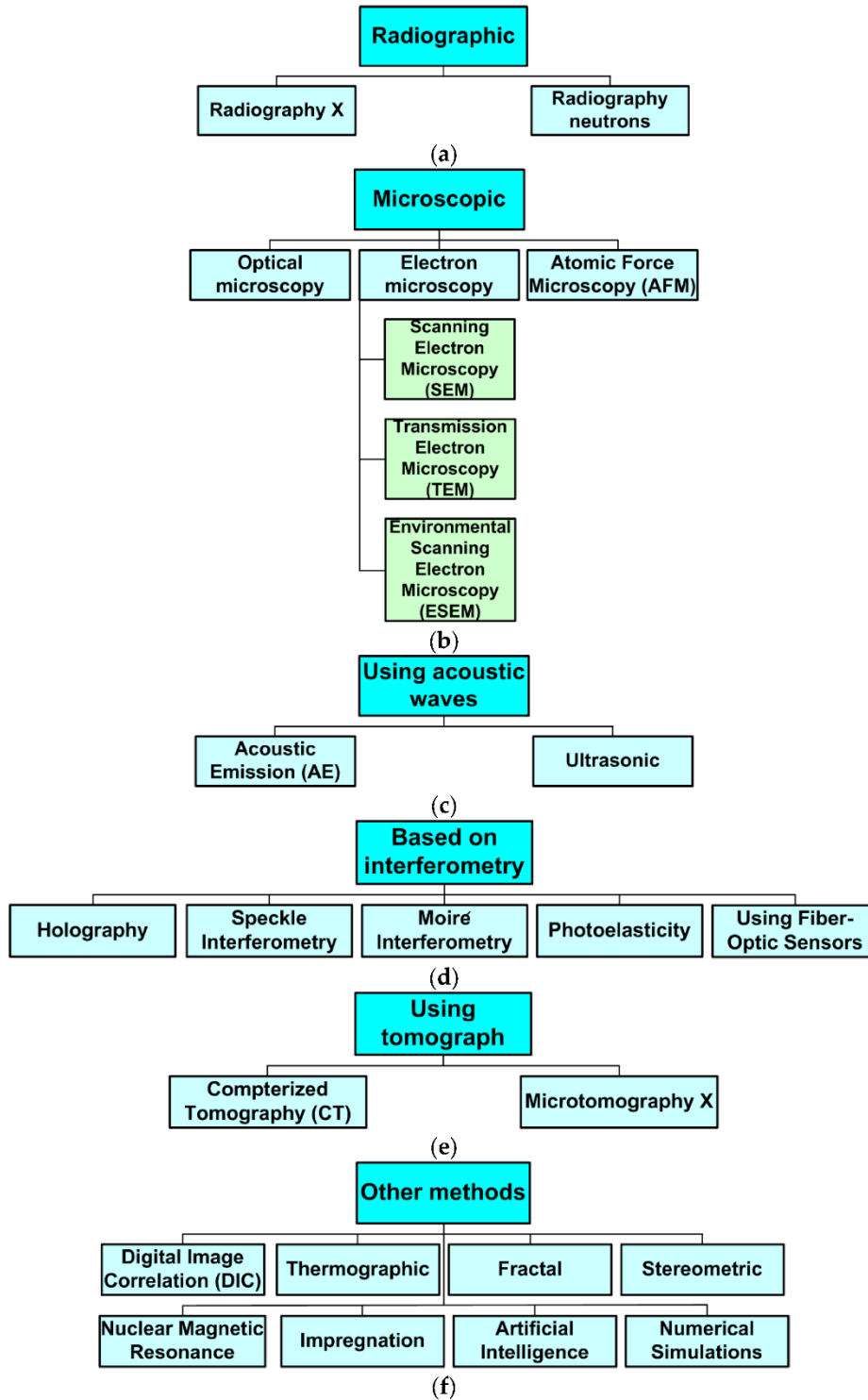
# ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

ISSN ۲۹۸۰-۷۷۸۶

برخلاف ترک های سطحی ، عرض ترک های کوچک که در داخل ساختار بتنی رخ می دهد با هیچ استاندارد محدود نمی شود. همچنین هیچ استاندارد یکنواخت برای تشخیص و مشاهده آنها وجود ندارد. در ادبیات، می توان روش های متعددی را برای شناسایی ریزگردها در عناصر بتنی پیدا کرد که بر اساس معیارهای مختلف طبقه بندی می شوند. بر اساس [۱۷۳]، روشهای تشخیص ترک در بتن را میتوان به سه دسته یعنی رادیوگرافی، ماکت و دسته اشباع تقسیم کرد، در حالی که بر اساس [۱۷۶] ، چنین آزمایشهایی شامل روشهای میکروسکوپی، صوتی و رادیوگرافی است. یکی از روش های مکان یابی ترک های داخلی در مطالب پیشنهادی نویسنده [۱۷۷] نیز بر اساس پدیده های صوتی است. علاوه بر این، مطالعه میکرو ترک ها در بتن را می توان بر اساس تکنیک های تداخل سنجی انجام داد [۱۷۸]. لازم به ذکر است که برخی از روش های موجود تجزیه و تحلیل میکرو کراک که در بالا توضیح داده شد در سال های اخیر اصلاح و به طور متوالی توسعه یافته است. برای نشان دادن این، شکل ۱۰ (در چندین زیرگروه) بیشتر روش های مورد استفاده برای ردیابی و مشاهده آسیب در یک ساختار بتنی را ارائه می دهد. در طبقه بندی آماده شده، بر روش های شناخته شده تجزیه و تحلیل ترک (به عنوان مثال ، اشعه ایکس و رادیوگرافی نوترونی) و همچنین آنهایی که حاوی پتانسیل جدید هستند به عنوان تکنیک های اندازه گیری در تجزیه و تحلیل ترک (به عنوان مثال امکان مدل سازی فضایی آسیب در بتن با استفاده از توموگرافی های کامپیوتری [۱۸۲، ۱۸۱، ۱۸۰، ۱۷۹، ۱۲۶] یا تصویربرداری رزونانس مغناطیسی [۱۸۴، ۱۸۳]) تأکید می شود. اطلاعات دقیق بیشتری در مورد هر یک از تکنیک های اندازه گیری ارائه شده در شکل ۱۰ را می توان در ادبیات انتخاب شده اضافه شده به طبقه بندی ارائه شده (شکل ۱۰) یافت. در زیر، شرح مختصری و طرح تاریخی از مشخصه ترین و مهم ترین روش های تشخیصی نیز گنجانده شده است.



ISSN ۲۹۸۰-۷۷۸۶





# ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

ISSN ۲۹۸۰-۷۷۸۶

شکل ۱۰. مهمترین روش های تشخیص و تحلیل ریزگردها و ترک ها در بتن های سیمانی: (الف) [۱۹۳، ۱۹۲، ۱۹۱، ۱۹۰، ۱۸۹، ۱۸۸، ۱۸۷، ۱۸۶، ۱۸۵]، (ب) [۲۰۴، ۲۰۳، ۲۰۲، ۲۰۱، ۲۰۰، ۱۹۹، ۱۹۸، ۱۹۷، ۱۹۶، ۱۹۵، ۱۹۴، ۱۹۳]، (ج) [۲۱۳، ۲۱۲، ۲۱۱، ۲۱۰، ۲۰۹، ۲۰۸، ۲۰۷، ۲۰۶، ۲۰۵، ۲۰۴]، (د) [۲۱۷، ۲۱۶، ۲۱۵، ۲۱۴، ۱۷۷]، (ه) [۱۸۲، ۱۸۱، ۱۸۰، ۱۷۹] و (و) [۲۲۵، ۲۲۴، ۲۲۳، ۲۲۲، ۲۲۱، ۲۲۰، ۲۱۹، ۲۱۸]

## ۴،۲. روش های رادیوگرافی

بیشتر روش های ذکر شده در شکل ۱۰ برای چندین دهه شناخته شده اند، مانند روش های میکروسکوپی، رادیوگرافی، اولتراسونیک و انتشار صوتی. یکی از اولین روش های تجزیه و تحلیل ریزگردها در بتن، بررسی رادیوگرافی بود. این روش در اوایل دهه ۱۹۶۰ توسط استاله و السفسکی [۱۸۵] معرفی شد و به طور مشابه با استفاده از آن در پزشکی، شامل ثبت شدت تابش ضعیف  $\gamma$  یا  $X$  بود که به عنصر بتنی تجزیه و تحلیل شده نفوذ می کرد. با استفاده از اصول "روشنایی" و "سایه" مورد استفاده در رادیوگرافی و تجزیه و تحلیل تصویر اشعه ایکس، می توان تخمین زد که کدام قسمت از نمونه های بتنی دارای قطعیت در ساختار مواد به شکل منافذ یا ترک ها هستند. چنین مناطقی در عکس های گرفته شده با نقاط یا خطوط سیاه مشخص می شدند که نشان می داد تابش در این منطقه توسط نمونه جذب نمی شود و می تواند از طریق خلاء در بتن به فیلم عکاسی برسد. در دهه های ۱۹۸۰ و ۱۹۹۰، اوتسوکا با استفاده از روش رادیوگرافی، سهم قابل توجهی در تجزیه و تحلیل فرآیندهای ترک در بتن داشت. در تحقیقات خود، او عمدتاً با ارزیابی توسعه منطقه فرآیند شکستگی [۱۸۶] قبل از نوک میکرو ترک و تأثیر حداکثر اندازه دانه کل ( $D_{max}$ ) بر اندازه و ساختار آن سروکار داشت. بر اساس عکس های گرفته شده، او مشخص کرد که حتی قبل از شکستن واضح در نیروی منحنی ( $F$ )، که به عنوان جابجایی باز شدن دهان ترک ( $CMOD$ ) یا  $f-CMOD$  شناخته می شود، شروع توسعه آسیب در حال حاضر قابل مشاهده است. علاوه بر این، ارزش انرژی ترک خوردگی به نسبت اندازه کل درشت مورد استفاده افزایش می یابد. برای تجزیه و تحلیل دقیق تر منطقه فرآیند شکستگی در عناصر بتنی، نویسندگان [۱۸۷] از یک تجزیه کننده انتشار صوتی فضایی همراه با روش رادیوگرافی با کنتراست استفاده کردند. تفسیر نتایج حاصل از هر دو دستگاه اندازه گیری نشان داد که با افزایش بار، منطقه فرآیند شکستگی از ترک های متعدد تشکیل شده است و اثرات توسعه آنها با رویدادهای AE همراه است. علاوه بر این، با افزایش  $D_{max}$  بتن، عرض منطقه ترک نیز افزایش می یابد، در حالی که طول آن کاهش می یابد. بنابراین، کوتاه تر است؛ با این حال، حجم بیشتری را در ساختار مواد آسیب دیده اشغال می کند [۱۸۷]. مزیت اصلی روش رادیوگرافی اشعه ایکس توانایی تجسم قطعیت های رخ داده در مواد و انجام ارزیابی بصری است. با این حال، نقص های بتنی مانند ترک ها، منافذ و لانه زنبوری را فقط می توان در تصاویر مسطح و فقط در جهات مطلوب جهت گیری شده به پرتو موج تجزیه و تحلیل کرد. یکی دیگر از معایب روش رادیوگرافی، وضوح ضعیف و حساسیت کم آن در هنگام تشخیص نقص است. گام مهم دیگر در توسعه ابزارهایی برای ارزیابی توزیع نقص در بتن، توسعه یک روش رادیوگرافی شامل استفاده از نوترون های فعال به جای اشعه ایکس بود (شکل ۱۰a). با گذشت زمان، رادیوگرافی نوترونی، به عنوان روشی دقیق تر و حساس تر به شناسایی ریزگردها در بتن، به روشی بسیار رقابتی تر برای نقشه برداری تصویر نسبت به رادیوگرافی اشعه ایکس تبدیل شده است. این عمدتاً به این دلیل است که تصاویر به دست آمده در مطالعات با استفاده از نوترون ها از کیفیت و وضوح بسیار بهتری نسبت به نتایج به دست آمده با روش رادیوگرافی قدیمی تر برخوردار هستند. بر اساس [۱۸۸، ۱۸۹، ۱۹۰]، روش رادیوگرافی نوترونی در ارزیابی آسیب بتن مفید است و موثرتر از روش رادیوگرافی اشعه ایکس سنتی است.



# ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

ISSN ۲۹۸۰-۷۷۸۶

در حال حاضر ، رادیوگرافی نوترونی نه تنها در ساخت و ساز و تحقیقات هسته ای ، بلکه در زیست شناسی و صنایع هواپیما و موشک نیز استفاده می شود. حساسیت بیشتر و امکانات بیشتر روش رادیوگرافی نوترونی در رابطه با روش رادیوگرافی اشعه ایکس در زمینه شناسایی ریزگردها در سازه بتنی نیز با نتایج تحقیقات ارائه شده در [۱۹۱] اثبات شده است. آنها نشان می دهند که حداقل اندازه یک نقص که می تواند توسط رادیوگرافی نوترونی شناسایی شود ۲۵ برابر کوچکتر از آسیب قابل مشاهده در تصاویر رادیوگرافی اشعه ایکس است. علاوه بر آزمایش اندازه میکرو ترک های داخلی در بتن ، روش رادیوگرافی نوترونی نیز کاربرد گسترده ای در ارزیابی دوام کامپوزیت ها از طریق اندازه گیری نفوذ آب یا مواد تهاجمی به ساختار آنها پیدا کرده است [۱۹۲، ۱۹۳]. طبق [۱۹۲] ، این یک روش عالی برای ارزیابی نفوذ رسانه ها از طریق بتن است زیرا آنها نوترون ها را بسیار بیشتر از اجزای اساسی تشکیل دهنده ساختار آن ، یعنی سیمان و سنگدانه تضعیف می کنند. چنین آزمایش هایی به ویژه در سازه های بتنی تقویت شده مهم هستند زیرا انتقال ناگهانی رطوبت یا عوامل خورنده می تواند منجر به تخریب سریع تقویت و بروز شرایط اضطراری در سازه شود. نمونه ای از نحوه استفاده از روش رادیوگرافی نوترونی در ارزیابی نفوذ آب به ناحیه میله های تقویت کننده ، در میان دیگران ، توسط [۱۹۳] ارائه شده است.

## ۴.۳. مشاهدات میکروسکوپی

میکروسکوپ ها برای مشاهده دقیق میکرو ترک های رخ داده در سازه های بتنی برای سال های زیادی استفاده شده اند. در میان میکروسکوپ های الکترونی که معمولاً استفاده می شود ، میکروسکوپ الکترونی اسکن (SEM) (شکل ۱۰b) بیشترین مزایای را برای تجزیه و تحلیل میکروترک ها دارد [۱۹۴، ۱۹۵]. بر اساس [۱۹۶] ، SEM یکی از پر کاربرد ترین ابزارهای موجود برای بررسی و تجزیه و تحلیل ویژگی های ریزساختاری و نقص اجسام جامد است ، در حالی که طبق [۱۹۷] ، SEM ابزار اصلی ارزیابی ریزساختارهای بتنی است. روش مشاهده فرایندهای ترک و شکستگی در بتن با استفاده از SEM اغلب برای ارزیابی تأثیر ساختار اولیه کامپوزیت یا نوع بارهای غالب بر اندازه آسیب های رخ داده [۱۹۸] و همچنین ارزیابی میزان نقص در مواد در معرض عوامل خورنده [۱۹۹] استفاده می شود. شکل ۹ انواع مختلفی از میکرو ترک ها را در تصاویر SEM نشان می دهد که بسته به نوع استرس ایجاد کننده آنها قابل مشاهده است. در حال حاضر ، به منظور انجام تحقیقات پیشرفته تر در مورد ساختار ترک ها در بتن و یادگیری علل دقیق شروع آنها ، از انواع پیشرفته جدید میکروسکوپ های الکترونی مانند ESEM، tem و میکروسکوپ های مدرن afm استفاده می شود (شکل ۱۰b). این میکروسکوپ ها به طور گسترده ای به عنوان یکی از مهمترین تکنیک های تصویربرداری برای تجزیه و تحلیل اتمی رابط ها ، ساختارها و ترکیبات شیمیایی در بتن های سیمان استفاده می شوند [۲۰۱، ۲۰۲، ۲۰۰]. به لطف استفاده از آنها ، می توان آسیب را هنگام در نظر گرفتن نوع فاز کامپوزیت بتن تشخیص داد و جهت گیری ترک را در رابطه با جهت الیاف در فاز تجزیه و تحلیل ، به عنوان مثال ، فاز C-S-h [۲۰۳، ۲۰۴] تخمین زد. تشخیص آسیب و ریزگردها در عناصر بتنی نیز می تواند با میکروسکوپ های انواع دیگر انجام شود ، به عنوان مثال ، میکروسکوپ های نوری سنتی [۲۰۵، ۱۷۳] (شکل ۱۰b). در [۱۷۳] ، تجزیه و تحلیل کامل پارامترهای هندسی که ترک ها را در سطح میان مقیاس مشخص می کند از جمله طول، عرض، سطح و تراکم ارائه شد. نتایج ارائه شده در [۱۷۳] همچنین ارتباط خوبی بین تراکم ترک و مقاومت فشاری بتن نشان داد.

## ۴.۴. روش های استفاده از امواج صوتی



# ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

ISSN ۲۹۸۰-۷۷۸۶

گروه دیگری از روش های مورد استفاده برای تجزیه و تحلیل توسعه میکرو ترک ها در بتن تکنیک هایی است که بر اساس پدیده های صوتی است. این شامل روش اولتراسونیک و روش انتشار صوتی (AE) (شکل ۱۰C) است. روش های اولتراسونیک برای سال های زیادی به عنوان یک روش غیر مخرب برای ارزیابی مقاومت بتن استفاده شده است. آنها همچنین این مزیت را دارند که می توانند نقص های داخلی در ساختار را تشخیص دهند و حتی می توانند اندازه خود را با درجه تقریبی بالا تخمین بزنند. روش های اولتراسونیک آنقدر دقیق هستند که برای تعیین تفاوت های ظریف در اندازه گیری های انجام شده استفاده می شوند، مانند نوع بار ایجاد کننده ترک (ترک هایی که در نتیجه خم شدن یا برش ایجاد می شوند) [۲۰۶] یا تفاوت در طول میکرو ترک [۲۰۷]. روش اولتراسونیک را می توان برای تجزیه و تحلیل توسعه آسیب نه تنها در بتن بارگذاری شده، بلکه در خمپاره ها و خمیرها نیز استفاده کرد. روش دیگری که پدیده های صوتی را در مطالعه ریزگردهای بتنی به کار میبرد، روش AE است. این بر اساس پدیده تشکیل و انتشار امواج الاستیک در یک محیط معین است که در نتیجه آزاد شدن انرژی الاستیک ذخیره شده در مواد ایجاد می شود. یکی از دلایل وقوع AE در مواد ساختمانی، شروع و توسعه میکروکراک هایی است که در فرآیندهای ترک ظاهر می شوند. فرض بر این است که آغاز تحقیقات در مورد رابطه بین ae و توسعه آسیب در بتن سال ۱۹۷۰ است، زمانی که گرین آزمایشات جامعی را انجام داد که به وضوح رابطه بین سیگنال ae تولید شده و توسعه آسیب در یک عنصر بتنی بارگیری شده را نشان داد [۲۰۸]. در حال حاضر، طیف کاربردهای پدیده AE در مطالعه نقص در کامپوزیت های بتنی بسیار گسترده است. آنالیزهای AE عمدتاً در آزمایشات آزمایشگاهی استفاده می شوند که شامل ارزیابی سطوح استرس بحرانی در بتن [۲۰۹]، آزمایش سختی شکستگی بتن در شکستگی های نوع I، نوع II و حالت مخلوط [۲۱۰، ۲۱۱، ۲۱۲] و تجزیه و تحلیل تأثیر زمان درمان بر توسعه فرآیندهای مخرب در بتن [۲۱۳] است. با تشکر از این روش و بر اساس تجزیه و تحلیل مقادیر پارامترهای خاص، همچنین می توان در مورد مرحله توسعه آسیب در مواد نتیجه گیری کرد. بر این اساس، در [۲۱۴] مراحل زیر از توسعه آسیب در بتن شناسایی شد:

ریزگردها قبل از شکستگی اصلی؛ شکستگی اصلی؛ بعد از شکستگی اصلی؛ پدیده AE نه تنها در آزمایشات آزمایشگاهی، بلکه در ارزیابی آسیب و ترک در تاسیسات و سازه های مهندسی، عمدتاً پل ها نیز مورد استفاده قرار می گیرد [۲۱۵]. شایان ذکر است، برای دستیابی به اثر مورد نظر آزمایش و برآورد مناسب اندازه و مورفولوژی ریزگردها یا ترک ها، باید یک تکنیک تجزیه و تحلیل آسیب مناسب انتخاب شود. این باید با پارامترهای زیر مشخص شود [۲۴۲]:

باید نسبتاً اقتصادی باشد؛ باید نقص ها را به سرعت تشخیص دهد؛ این باید با وضوح بالا مشخص شود، یعنی قادر به تشخیص میکرو ترک های بسیار کوچک است؛ این باید اطلاعات کمی را که به راحتی با یک سیستم تجزیه و تحلیل تصویر مرتبط است، ارائه دهد. علاوه بر این، انتخاب روش مشاهده ترک باید به نوع بارهای غالب (استاتیک، پویا، ضربه) بستگی داشته باشد. سپس می توان حتی تفاوت بسیار ظریف در نتایج تحقیقات به دست آمده را تشخیص داد. به عنوان مثال، در [۲۰۸] و بر اساس تجزیه و تحلیل تصاویر به دست آمده تحت میکروسکوپ نوری، مشخص شد که طول ترک ها در itz بتن تحت بارهای خستگی ۱۵٪ بیشتر از ترک هایی است که در عناصر تحت بارهای استاتیک رخ می دهد. اغلب، برای ارزیابی دقیق آسیب های رخ داده، دو یا حتی سه روش تحقیقاتی به طور موازی استفاده می شود، مانند ترکیبی از روش های رادیوگرافی، هولوگرافی لیزری یا توموگرافی کامپیوتری با AE یا SEM





# ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

ISSN ۲۹۸۰-۷۷۸۶

[۱۷۸،۱۸۲،۲۱۸،۲۴۲،۲۴۳]. در بسیاری از موارد ، ae یا ترموگرافی با روش اولتراسونیک برای تجزیه و تحلیل محل آسیب و جهت انتشار آن استفاده می شود [۲۰۶،۲۱۴].

نتایج بسیار خوبی از نظر تشخیص ریزگردهای بتنی نیز با ترکیب تکنیک های AE و DIC [۲۴۴،۲۴۵] یا AE با هندسه محاسباتی [۲۴۶] به دست آمد. مشخص شد که تکنیک AE در شناسایی محل رشد شکستگی به دلیل میکرو ترک ها و ماکرو ترک ها مفید است ؛ با این حال ، DIC در اندازه گیری باز شدن ترک ها در مکان های مختلف آنها مفید است. علاوه بر این ، محل نوک ترک نیز با هر دو تکنیک تخمین زده می شود [۲۴۷]. یک تصویر دقیق از مسیرهای ترک خورده با کنار هم قرار دادن چندین دستگاه مستقل ردیابی ترک بتن به دست می آید. برای این منظور می توان از یک پایه تست متشکل از یک آنالایزر AE ، یک میکروتوموگراف رایانه ای و یک SEM استفاده کرد [۲۴۲]. در طول تجزیه و تحلیل ساختار نمونه های بتنی ، سنسور AE وقوع آسیب را پیدا می کند ، توموگراف امکان فضایی نقص های حاصل را فراهم می کند و میکروسکوپ از میکروس truktore مواد آسیب دیده عکس می گیرد [۲۴۲]. در حال حاضر، با استفاده از توموگرافی های کامپیوتری ، می توان ساختار میکرو ترک ها را در فضای سه بعدی نمونه به طور دقیق تشخیص داد. پس از آن ، با استفاده از برنامه برای تجسم آسیب شناسایی شده ، یک تصویر فضایی دقیق از قطعیت های رخ داده در بتن تولید می شود [۲۴۸]. همچنین باید توجه داشت که اخیراً در زمینه تشخیص ترک در عناصر بتنی ، Ndt ها نیز توسعه یافته اند. روش های مبتنی بر هوش مصنوعی نیز بیشتر و بیشتر در چنین تحقیقاتی مورد استفاده قرار می گیرند. هنگام جمع بندی ویژگیهای روشهایی که امکان تشخیص موثر فرآیند ریزگردها و ترک خوردگی در عناصر ساخته شده از بتن را فراهم می کند ، باید گفت که تمام تکنیک های ارائه شده در شکل ۱۰ و شکل ۱۱ ، و به طور خلاصه در متن مشخص شده است ، روند متریکی شروع ریزگردها و پدیده ضرب و انتشار متوالی آنها در کنار افزایش بار را تأیید می کند. علاوه بر این ، به دلیل روش های مختلف تشخیص نقص و درجه های مختلف حساسیت ، می توان از این روش های اندازه گیری برای شناسایی ریز ترک ها و تجزیه و تحلیل اثرات ترک ها در انواع بسیار مختلف کامپوزیت های شکننده و در شدت های مختلف استرس های رخ داده استفاده کرد [۱۸۶].

## ۵. نتیجه گیری

مقاومت و دوام عناصر ساختاری بتنی تا حد زیادی توسط نقص ها و آسیب هایی که در ساختار بتن جوان و سپس بالغ رخ می دهد تعیین می شود. این به این دلیل است که مکان های ضعیف تر در کامپوزیت بتن باعث غلظت تنش ها می شود و نفوذ عوامل مختلف خارجی را تسهیل می کند. در مکان هایی که ترک ها و ترک ها گسترش می یابند ، قدرت کاهش می یابد ، با تخریب مواد محلی و شرایط اضطراری که به این ترتیب رخ می دهد. بنابراین ، مسائلی که در مقاله مورد بررسی قرار گرفته است ، جنبه های مهمی را در رابطه با ایمنی و قابلیت استفاده از سازه های بتنی در نظر می گیرد. تجزیه و تحلیل این مشکلات بسیار دشوار است زیرا ترکیب بتن در عناصر ساختاری هم از خاصیت سازه های بتنی تقویت شده و هم از خواص کامپوزیت های ذاتی در یک ماتریس سیمان حاصل می شود. بنابراین ، مقاله بررسی عمیق مسائل مربوط به فرآیند تشکیل و انتشار ریزگردها و ترک ها در بتن های سیمانی را ارائه می دهد. محتوای پایان نامه عمدتاً بر دلایل تشکیل ریزگردها در ساختار مواد ، معیارهای اساسی طبقه بندی این نقص ها و



# ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

ISSN ۲۹۸۰-۷۷۸۶

رایج ترین روش های مورد استفاده برای تشخیص و تجزیه و تحلیل آنها متمرکز است. دو نوع از علل آسیب در بتن و عناصر بتن مسلح وجود دارد ، به ویژه: عیوب اولیه-ناشی از خواص طبیعی مواد یا ناشی از خطاهای طراحی و اجرا؛ نقص های ثانویه-در طول بهره برداری از ساخت و ساز رخ می دهد.

در این مرحله، توجه ویژه ای به خطر شروع ریزگردها در دوره اولیه بتن ریزی، یعنی در سنین پایین ، پرداخت شد. موادی که بیشتر در معرض این پدیده قرار می گیرند بتن های عظیم و بتن های با عملکرد بالا هستند. همچنین مشخص شد که امکان محدود کردن این پدیده های نامطلوب با اصلاح اتصال چنین بتن هایی با خاکستر مگس وجود دارد. در تحلیل ها انواع ترک های ایجاد شده در کامپوزیت های بتنی بر اساس هشت معیار خاص تقسیم شدند. تصاویر ترک های رخ داده به صورت ماکروسکوپی در عناصر بتن مسلح بسته به نوع بارهای غالب مورد مطالعه قرار گرفت و سپس تصاویر مشخصه میکروکراک های مرتبط با یک مورد خاص از ماکروکراک ها استخراج شد.

به دلیل عدم وجود اطلاعات کامل در رابطه با رابطه بین مسیرهای ماکروکراک ها و مورفولوژی میکروکراک های موجود در ساختار مواد ، تجزیه و تحلیل میکروسکوپی اختصاصی ساختارهای آسیب دیده انجام شد. عناصر ساختاری آسیب دیده به دلیل کشش، برش و پیچش در نظر گرفته شد. در نتیجه تجزیه و تحلیل های انجام شده ، موارد زیر تعیین شده است:

در عناصر تنش زده ، میکرو ترک ها معمولاً به شکل مستقیم هستند و عمدتاً در منطقه ITZ رخ می دهند (شکل a۹)؛ در عناصر برش ، میکروکراک های نوع بال با بال های مستقیم وجود دارد که در زاویه های مختلف از سطح بخش مستقیم میکروکراک منحرف می شوند (شکل b۹)؛ تنش های پیچشی باعث تغییر در مورفولوژی میکروکراک بال می شود. در حین پیچیدن ، نوک بال ها پیچ خورده است و بتن در اتصال با قسمت مستقیم میکرو ترک ، یعنی مکان های غلظت استرس ، به وضوح خرد می شود (شکل c۹).

در بخش دوم نسخه خطی ، بررسی گسترده ای از روش های تشخیصی مورد استفاده برای پیدا کردن و توصیف جهت انتشار ترک ها و میکرو ترک ها در بتن انجام شد. هر دو روش اندازه گیری سنتی و شناخته شده و همچنین روش های تشخیصی مدرن و به طور مداوم در حال توسعه، در نظر گرفته شد. مشخص شده است که اولین آسیب در سازه های بتنی را می توان از طریق یکی از چندین روش تشخیصی تشخیص داد (شکل ۱۰). متداول ترین روش ها شامل روش های میکروسکوپی ، صوتی ، رادیوگرافی و فرکتال و همچنین روش های مربوط به ترموگرافی کامپیوتری است. از سوی دیگر ، ترموگرافی و DIC به گروه روش های مدرن مورد استفاده برای تجزیه و تحلیل ترک ها در سطح عناصر بتنی تعلق دارند. با این حال ، باید اضافه شود که تکنیک DIC نیز به طور موثر در روند ردیابی میکرو ترک ها استفاده می شود.

با توجه به این دو روش تشخیصی مفید و نسبتاً جدید ، مقایسه مزایا و محدودیت های آنها در رابطه با استفاده از آنها انجام شد. بر این اساس ، مشخص شد که مزایای اصلی هر دو ترموگرافی و روش DIC روش غیر تماسی انجام اندازه گیری ها و امکان یافتن آسیب بدون توجه به ابعاد عنصر ساختاری است. متأسفانه ، معایب آنها شامل الگوریتم های ریاضی پیچیده ای است که برای تولید نتایج خاص از آزمایش ها استفاده می شود. در مورد روش DIC ، آماده سازی نمونه ها برای آزمایش نیز مشکل ساز است. با این حال، این با نتایج بسیار دقیق در آزمایشات انجام شده و کاهش هزینه های مربوط به روش اندازه گیری خسارت جبران می شود. علاوه بر این،



# ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

ISSN ۲۹۸۰-۷۷۸۶

بر اساس بررسی آخرین ادبیات در این زمینه، مشخص شده است که در زمینه تشخیص ترک در عناصر بتنی، Ndt ها در سال های اخیر توسعه قابل توجهی داشته اند. چندین روش کاملاً جدید و مفید برای تشخیص نقص در مواد در این زمینه پدیدار شده است. مشخص شده است که آزمایشات تشخیصی مدرن در این زمینه شامل استفاده از روش هایی مانند فرکانس جارو و نفوذ زمین و همچنین آنهایی است که از سنسورهای مادون قرمز، فیبر نوری یا سیستم های نظارت لیزری استفاده می کنند. علاوه بر این، روش های مبتنی بر پدیده هوش مصنوعی نیز به طور فزاینده ای مورد استفاده قرار می گیرند. به منظور درک کامل فرایندهای تشکیل و تکثیر ریزگردها و ترک ها در بتن، توصیه می شود همزمان دو یا حتی سه روش اندازه گیری را ترکیب کنید. در آینده، چنین مطالعاتی می تواند به تیز کردن معیارهای شروع و انتشار ترک ها، پیش بینی جهت رشد ترک ها و تجزیه و تحلیل مشکلات پیچیده مربوط به انتشار ترک ها کمک کند. لازم به ذکر است که موضوع ریزگردها و ترک ها در بتن و سازه های ساخته شده از بتن از بسیاری جهات مهم است زیرا مربوط به، در یک رویکرد جامع، دوام ساختمان ها، ایمنی افرادی که در داخل خانه می مانند و هزینه های مربوط به تعمیرات احتمالی عناصر ساختاری آسیب دیده است. بنابراین، این موضوع خواستار مطالعات بیشتر در مورد توسعه تکنیک های اندازه گیری غیر مخرب مدرن است که می تواند برای تجزیه و تحلیل دقیق تشکیل و انتشار ترک ها در مواد استفاده شود. این تکنیک ها تشخیص نقص های اولیه را خیلی قبل از اینکه به آسیب ماکروسکوپی تبدیل شوند و در نهایت باعث تغییر شکل بتن شوند، امکان پذیر می کند. چنین رویکردی از نیاز به تعمیرات گران قیمت عناصر آسیب دیده جلوگیری می کند.

## منابع

1. Pacheco-Torgal, F. High Tech Startup Creation for Energy Efficient Built Environment. *Renew. Sustain. Energy Rev.* ۲۰۱۷, ۷۱, ۶۱۸-۶۲۹.
2. Golewski, G.L. The Specificity of Shaping and Execution of Monolithic Pocket Foundations (PF) in Hall Buildings. *Buildings* ۲۰۲۲, ۱۲, ۱۹۲
3. Kovacik, J.; Marsavina, L.; Linul, E. Poisson's Ratio of Closed-cell Aluminum Foams. *Materials* ۲۰۱۸, ۱۱, ۱۹۰۴.
4. Lata, P.; Kaur, I. Thermomechanical Interactions in Transversely Isotropic Magneto Thermoelastic Solid with Two Temperatures and Without Energy Dissipation. *Steel Compos. Struct.* ۲۰۱۹, ۳۲, ۷۷۹-۷۹۳.
5. Khaji, Z.; Fakoor, M. Strain Energy Release Rate in Combination with Reinforcement Isotropic Solid Model (SERIS): A new Mixed-Mode I/II Criterion to Investigate Fracture Behavior of Orthotropic Materials. *Theor. Appl. Fract. Mech.* ۲۰۲۱, ۱۱۳, ۱۰۲۹۶۲.
6. Craciun, E.M. Energy Criteria for Crack Propagation in Prestresses Elastic Composites. *Sol. Mech. Appl.* ۲۰۰۸, ۱۵۴, ۱۹۳-۲۳۷.
7. Suchorab, Z.; Franus, M.; Barnat-Hunek, D. Properties of Fibrous Concrete Made with Plastic Fibers from E-Waste. *Materials* ۲۰۲۰, ۱۳, ۲۴۱۴.
8. Golewski, G.; Sadowski, T. Fracture Toughness at Shear (Mode II) of Concretes Made of Natural and Broken Aggregates. *Brittle Matrix Compos.* ۲۰۰۶, ۸, ۵۳۷-۵۴۶.
9. Li, H.; Sun, H.; Zhang, W.; Gou, H.; Yang, Q. Study on Mechanical Properties of Self-Compacting Concrete and its Filled in-line Multi-Cavity Steel Tube Bundle Shear Wall. *Energies* ۲۰۱۹, ۱۲, ۳۴۶۶.
۱۰. Abolhasani, A.; Nazarpour, H.; Dehestani, M. Effects of Silicate Impurities on Fracture Behavior and Microstructure of Calcium Aluminate Cement Concrete. *Eng. Fract. Mech.* ۲۰۲۱, ۲۴۲, ۱۰۷۴۴۶.
۱۱. Saini, G.S.; Erge, O.; Ashok, P.; van Oort, E. Well Construction Action Planning and Automation through Finite-Horizon Sequential Decision-Making. *Energies* ۲۰۲۲, ۱۵, ۵۷۷۶.



۱۲. Fakoor, M.; Rafiee, R.; Zare, S. Equivalent Reinforcement Isotropic Model for Fracture Investigation of Orthotropic Materials. *Steel Compos. Struct.* ۲۰۱۹, ۳۰, ۱-۱۲.
۱۳. Bao, H.; Peng, J.; Cheng, Z.; Hong, J.; Gao, Y. Experimental Study on Inner Interface Mechanical Properties of the ESDCM Pile with Steel Core. *Buildings* ۲۰۲۳, ۱۳, ۴۸۶.
۱۴. Golewski, G.L. Green Concrete Based on Quaternary Binders with Significant Reduced of CO<sub>2</sub> Emissions. *Energies* ۲۰۲۱, ۱۴, ۴۵۵۸.
۱۵. Kang, S.-H.; Kwon, Y.-H.; Moon, J. Quantitative analysis of CO<sub>2</sub> uptake and mechanical properties of air lime-based materials. *Energies* ۲۰۱۹, ۱۲, ۲۹۰۳.
۱۶. Szczeniak, A.; Zychowicz, J.; Stolarski, A. Influence of Fly Ash Additive on the Properties of Concrete with Slag Cement. *Materials* ۲۰۲۰, ۱۳, ۳۲۶۵.
۱۷. Wardach, M.; Krentowski, J.R.; Mackiewicz, M. Evaluation of Precast Beam Deflections Resulting in Cracks in Curtain Walls. *Eng. Fail. Anal.* ۲۰۲۲, ۱۴۰, ۱۰۶۵۶۸.
۱۸. Chen, S.; Wang, H.; Guan, J.; Yao, X.; Li, L. Determination Method and Prediction Model of Fracture and Strength of Recycled Aggregate Concrete at Different Curing Ages. *Constr. Build. Mater.* ۲۰۲۲, ۳۴۳, ۱۲۸۰۷۰.
۱۹. Guan, J.; Yin, Y.; Li, Y.; Yao, X.; Li, L. A Design Method for Determining Fracture Toughness and Tensile Strength Pertinent to Concrete Sieving Curve. *Eng. Fract. Mech.* ۲۰۲۲, ۲۷۱, ۱۰۸۵۹۶.
۲۰. Wu, J.; Yang, J.; Zhang, R.; Jin, L.; Du, X. Fatigue Life Estimating for Chloride Attacked RC Beams Using S-N Curve Combined with Mesoscale Simulation of Chloride Ingress. *Int. J. Fat.* ۲۰۲۲, ۱۵۸, ۱۰۶۷۵۱.
۲۱. Nikbin, I.M.; Golshekan, M. The Effect of Expanded Polystyrene Synthetic Particles on the Fracture Parameters, Brittleness and Mechanical Properties of Concrete. *Theor. Appl. Fract. Mech.* ۲۰۱۸, ۹۴, ۱۶۰-۱۷۲.
۲۲. Reis, J.M.L.; Chianelli-Junior, R.; Cardoso, J.L.; Marinho, F.J.V. Effect of Recycled PET in the Fracture Mechanics of Polymer Mortar. *Constr. Build. Mater.* ۲۰۱۱, ۲۵, ۲۷۹۹-۲۸۰۴.
۲۳. Wong, L.S.; Chandran, S.N.; Rajasekar, R.R.; Komg, S.Y. Pozzolanic Characterization of Waste Newspaper Ash a Supplementary Cementing Material of Concrete Clinders. *Case Stud. Constr. Mater.* ۲۰۲۲, ۱۷, e۰۱۳۴۲.
۲۴. AL-Shalif, S.A.H.; Akın, A.; Aksoylu, C.; Arslan, M.H. Strengthening of Shear-Critical Reinforced Concrete T-Beams with Anchored and Non-Anchored GFRP Fabrics Applications. *Structures* ۲۰۲۲, ۴۴, ۸۰۹-۸۲۷.
۲۵. Aksoylu, C. Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams with Minimum CFRP and GFRP Strips Using Different Wrapping Technics without Anchoring Application. *Steel Compos. Struct.* ۲۰۲۲, ۴۴, ۸۴۵-۹۶۵.
۲۶. Ozkılıç, Y.O.; Gemi, L.; Madenci, E.; Aksoylu, C. Effects of Stirrup Spacing on Shear Performance of Hybrid Composite Beams Produced by Pultruded GFRP Profile Infilled with Reinforced Concrete. *Arch. Civ. Mech. Eng.* ۲۰۲۳, ۲۳, ۳۶.
۲۷. Madenci, E.; Özkılıç, Y.O.; Aksoylu, C.; Safonov, A. The Effects of Eccentric Web Openings on the Compressive Performance of Pultruded GFRP Boxes Wrapped with GFRP and CFRP Sheets. *Polymers* ۲۰۲۲, ۱۴, ۴۵۶۷.
۲۸. Gemi, L.; Madenci, E.; Özkılıç, Y.O.; Yazman, Ş.; Safonov, A. Effect of Fiber Wrapping on Bending Behavior of Reinforced Concrete Filled Pultruded GFRP Composite Hybrid Beams. *Polymers* ۲۰۲۲, ۱۴, ۳۷۴۰.
۲۹. Aksoylu, C.; Özkılıç, Y.O.; Madenci, E.; Safonov, A. Compressive Behavior of Pultruded GFRP Boxes with Concentric Openings Strengthened by Different Composite Wrappings. *Polymers* ۲۰۲۲, ۱۴, ۴۰۹۵.
۳۰. Özkılıç, Y.O.; Aksoylu, C.; Yazman, Ş.; Gemi, L.; Arslan, M.H. Behavior of CFRP-Strengthened RC beams with Circular Web Openings in Shear Zones: Numerical Study. *Structures* ۲۰۲۲, ۴۱, ۱۳۶۹-۱۳۸۹.
۳۱. Arslan, M.H.; Yazman, Ş.; Hamad, A.A.; Aksoylu, C.; Özkılıç, Y.O.; Gemi, L. Shear Strengthening of Reinforced Concrete T-beams with Anchored and Non-Anchored CFRP Fabrics. *Structures* ۲۰۲۲, ۳۹, ۵۲۷-۵۴۲.
۳۲. Gemi, L.; Alsdudi, M.; Aksoylu, C.; Yazman, Ş. Optimum amount of CFRP for strengthening shear deficient reinforced concrete beams. *Steel Compos. Struct.* ۲۰۲۲, ۴۳, ۷۳۵-۷۵۷.



۳۳. Özkılıç, Y.O.; Yazman, Ş.; Aksoylu, C.; Arslan, M.H.; Gemi, L. Numerical Investigation of the Parameters Influencing the Behavior of Dapped end Prefabricated Concrete Purlins with and without CFRP Strengthening. *Struct. Constr. Build. Mater.* ۲۰۲۱, ۲۷۵, ۱۲۲۱۷۳.
۳۴. Pathak, S.S.; Vesmawala, G.R. Influence of TiO<sub>2</sub> and Fly Ash on Fracture Parameters of Concrete Notched Beams. *J. Adv. Concr. Tech.* ۲۰۲۲, ۲۰, ۶۲۴-۶۳۹.
۳۵. Golewski, G.L. Studies of Natural Radioactivity of Concrete with Siliceous Fly Ash Addition. *Cem. Wapno Beton* ۲۰۱۵, ۲, ۱۰۶-۱۱۴.
۳۶. Akram, A. The Overview of Fracture Mechanics Models for Concrete. *Arch. Civ. Eng. Env.* ۲۰۲۱, ۱, ۳۷۶-۳۸۵.
۳۷. Peng, J.; Wu, Z.; Zhao, G. Fractal analysis of fracture in concrete. *Theor. Appl. Fract. Mech.* ۱۹۹۷, ۲۷, ۱۳۵-۱۴۰.
۳۸. Słowik, M. The Role of Aggregate Granulation on Testing Fracture Properties of Concrete. *Frat. Int. Strutt.* ۲۰۲۱, ۵۸, ۴۷-۵۷.
۳۹. Krentowski, J.R. Disaster of an Industrial Hall Caused by an Explosion of Wood Dust and Fire. *Eng. Fail. Anal.* ۲۰۱۵, ۵۶, ۴۰۳-۴۱۱.
۴۰. Zhang, P.; Wei, S.; Wu, J.; Zhang, Y.; Zheng, Y. Investigation of Mechanical Properties of PVA Fiber-Reinforced Cementitious Composites under the Coupling Effect of Wet-Thermal and Chloride Salt Environment. *Case Stud. Constr. Mater.* ۲۰۲۲, ۱۷, e۰۱۳۲۵.
۴۱. Wittmann, F.H. Crack formation and fracture energy of normal and high strength concrete. *Sadhana* ۲۰۰۲, ۲۷, ۴۱۳-۴۲۳.
۴۲. Fu, J.; Sarfarazi, V.; Haeri, H.; Shahbazian, A.; Marji, M.F.; Yu, Y. Study of Tensile Crack Growth in Rock-Like Materials under Punch Shear Test. *Theor. Appl. Fract. Mech.* ۲۰۲۲, ۱۲۱, ۱۰۳۵۰۹.
۴۳. Mohan, D.; Chinnasamy, B.; Naganathan, S.K.; Nagaraj, N.; Jule, L.; Badassa, B.; Ramaswamy, K.; Kathirvel, P.; Murali, G.; Vatin, N.I. Experimental Investigation and Comparative Analysis of Aluminium Hybrid Metal Matrix Composites Reinforced with Silicon Nitride, Eggshell and Magnesium. *Materials* ۲۰۲۲, ۱۵, ۶۰۹۸.
۴۴. Golewski, G.L. An Extensive Investigations on Fracture Parameters of Concretes Based on Quaternary Binders (QBC) by means of the DIC technique. *Constr. Build. Mater.* ۲۰۲۲, ۲۵۱, ۱۲۸۸۲۳.
۴۵. Lian, H.; Sun, X.; Yu, Z.; Yang, T.; Zhang, J.; Li, G.; Guan, Z.; Diao, M. Research on the Fracture Mechanical Performance of Basalt Fiber Nano-CaCO<sub>3</sub> Concrete Based on DIC Technology. *Constr. Build. Mater.* ۲۰۲۲, ۳۲۹, ۱۲۷۱۹۳.
۴۶. Chen, Y.; Feng, J. Experimental Study on Effect of Coarse Aggregate Volume Fraction on Mode I and Mode II Fracture Behavior of Concrete. *J. Adv. Concr. Tech.* ۲۰۲۲, ۲۰, ۵۷-۷۱.
۴۷. Gil, D.M.; Golewski, G.L. Potential of Siliceous Fly Ash and Silica Fume as a Substitute of Binder in Cementitious Concrete. *E 3S Web Conf.* ۲۰۱۸, ۴۹, ۰۰۳۰.
۴۸. Fakoor, M.; Shahsavari, S. The Effect of T-Stress on Mixed Mode I/II Fracture of Composite Materials: Reinforcement Isotropic Solid Model in Combination with Maximum Shear Stress Theory. *Int. J. Sol. Struct.* ۲۰۲۱, ۲۲۹, ۱۱۱۱۴۵.
۴۹. Golewski, G.L. Physical Characteristics of Concrete, Essential in Design of Fracture-Resistant, Dynamically Loaded Reinforced Concrete Structures. *Mater. Des. Proc. Comm.* ۲۰۱۹, ۱, e۸۲.
۵۰. Golewski, G.L. Changes in the Fracture Toughness under Mode II Loading of Low Calcium Fly Ash (LCFA) Concrete Depending on Ages. *Materials* ۲۰۲۰, ۱۳, ۵۲۴۱.
۵۱. Tang, Y.; Huang, Z.; Chen, Z.; Chen, M.; Zhou, H.; Zhang, H.; Sun, J. Novel Visual Crack Width Measurement Based on Backbone Double-Scale Features for Improved Detection Automation. *Eng. Struct.* ۲۰۲۳, ۲۷۴, ۱۱۵۱۵۸.
۵۲. Wang, J.; Li, J.; Shi, Z.; Chen, J. Energy Evolution and Failure Characteristics of Red Sandstone under Discontinuous Multilevel Fatigue Loading. *Int. J. Fat.* ۲۰۲۲, ۱۶۰, ۱۰۶۸۳۰.
۵۳. Fu, J.; Haeri, H.; Sarfarazi, V.; Marji, M.F. Interaction Between the Notch and Mortar-Mortar Interface (with Different Inclinations) in Semi-Circular Bend Specimens. *Iran. J. Sci. Technol. Trans. Civ. Eng.* ۲۰۲۱, ۴۶, ۲۷۴۷-۲۷۶۳.



۵۴. Zhang, P.; Sha, D.; Li, Q.; Zhao, S.; Ling, Y. Effect of Nano Silica Particles on Impact Resistance and Durability of Concrete Containing Coal Fly Ash. *Nanomaterials* ۲۰۲۱, ۱۱, ۱۲۹۶.
۵۵. Johnpaul, V.; Santhiya, K.; Balasundaram, N. Enhancing the Durability and Morphology Characteristic of Concrete Using Nano-Based GGBFS. *Iran. J. Sci. Technol. Trans. Civ. Eng.* ۲۰۲۲.
۵۶. Barroqueiro, T.; da Silva, P.R.; de Brito, J. High-Performance Self-Compacting Concrete with Recycled Aggregates from the Precast Industry: Durability Assessment. *Buildings* ۲۰۲۰, ۱۰, ۱۱۳.
۵۷. Golewski, G.L. Fracture Performance of Cementitious Composites Based on Quaternary Blended Cements. *Materials* ۲۰۲۲, ۱۵, ۶۰۲۳.
۵۸. Słowik, M.; Stroeven, P.; Akram, A. Crack Mechanisms in Concrete—From Micro to Macro Scale. *Bud. Arch.* ۲۰۲۰, ۱۹, ۵۵-۶۶.
۵۹. de Andrade Silva, F.; Mobasher, B.; Toledo Filho, R.D. Cracking mechanisms in durable sisal fiber reinforced cement composites. *Cem. Concr. Compos.* ۲۰۰۹, ۳۱, ۷۲۱-۷۳۰.
۶۰. Fu, J.; Safaei, M.R.; Haeri, H.; Sarfarazi, V.; Marji, M.F.; Xu, L.; Arefnia, A. Experimental Investigation on Deformation Behavior of Circular Underground Opening in Hard Soil using a ۳D Physical Model. *J. Min. Env.* ۲۰۲۲, ۱۳, ۷۲۷-۷۴۹.
۶۱. Slate, F.O. Discussion: Concrete Strength and Mechanisms of Failure under Short Term Loading. In Proceedings of the International Conference Structure Concrete, London, UK, ۱۹ December ۱۹۶۸.
۶۲. Li, A.; Yang, Z.; Liu, S.; Liu, Y.; Liu, H. Experimental Study on Flexural Fatigue Behavior of Composite T-Beams in Ultra-High Performance Concrete Reinforced and Normal-Strength Concrete. *Int. J. Fat.* ۲۰۲۳, ۱۶۷, ۱۰۷۲۳۰.
۶۳. Kabantsev, O.; Kovalev, M. Failure Mechanisms and Parameters of Elastoplastic Deformations of Anchorage in a Damaged Concrete Base under Seismic Loading. *Buildings* ۲۰۲۲, ۱۲, ۷۸.
۶۴. Zhang, P.; Yuan, P.; Guan, J.; Guo, J. Fracture Behavior of Multi-Scale Nano-SiO<sub>2</sub> and Polyvinyl Alcohol Fiber Reinforced Cementitious Composites under the Complex Environments. *Theor. Appl. Fract. Mech.* ۲۰۲۲, ۱۲۲, ۱۰۳۵۸۴.
۶۵. Golewski, G.L.; Szostak, B. Strength and Microstructure of Composites with Cement Matrixes Modified by Fly Ash and Active Seeds of C-S-H Phase. *Struct. Eng. Mech.* ۲۰۲۲, ۸۲, ۵۴۳-۵۵۶.
۶۶. Neimitz, A. *Mechanika Pękania*; PWN: Warsaw, Poland, ۱۹۹۸. (In Polish)
۶۷. Van Mier, J.G.M. Fracture Processes of Concrete. In *Assessment of Material Parameters for Fracture Models*; CRC Press: Boca Raton, FL, USA; New York, NY, USA, ۲۰۰۰.
۶۸. Golewski, G.L. Generalized Fracture Toughness and Compressive Strength of Sustainable Concrete Including Low Calcium Fly Ash. *Materials* ۲۰۱۷, ۱۰, ۱۳۹۳.
۶۹. Murali, G.; Abid, S.R.; Al-Lami, K.; Vatin, N.I.; Dixit, S.; Fediuk, R. Pure and mixed-mode (I/III) fracture toughness of preplaced aggregate fibrous concrete and slurry infiltrated fibre concrete and hybrid combination comprising nano carbon tubes. *Constr. Build. Mater.* ۲۰۲۳, ۳۶۲, ۱۲۹۶۹۶.
۷۰. Berto, F.; Ayatollahi, M.; Marsavina, L. Mixed Mode Fracture. *Theoret. Appl. Fract. Mech.* ۲۰۱۷, ۹۱, ۱.
۷۱. Mehri Khansari, N.; Fakoor, M.; Berto, F. Probabilistic micromechanical damage model for mixed mode I/II fracture investigation of composite materials. *Theor. Appl. Fract. Mech.* ۲۰۱۹, ۹۹, ۱۷۷-۱۹۳.
۷۲. Haeri, H. Experimental Crack Analyses of Concrete-Like CSCBD Specimens Using a Higher Order DDM. *Comp. Concr.* ۲۰۱۵, ۱۶, ۸۸۱-۸۹۶.
۷۳. Golewski, G.L. An Analysis of Fracture Toughness in Concrete with Fly Ash Addition, Considering All Models of Cracking. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* ۲۰۱۸, ۴۱۶, ۰۱۲۰۲۹
۷۴. Miannay, D.P. *Fracture Mechanics*; Springer-Verlag: New York, NY, USA, ۱۹۹۸.
۷۵. Hillerborg, A.E.; Modeer, M.E.; Petersson, P.E. Analysis of Crack Formation and Crack Growth by Means of Fracture Mechanics and Finite Elements. *Cem. Concr. Res.* ۱۹۷۶, ۶, ۷۷۳-۷۸۱.
۷۶. Bazant, Z.P.; Oh, B.H. Crack Band Theory for Fracture of Concrete. *Mater. Struct.* ۱۹۸۳, ۱۶, ۱۵۵-۱۷۷.
۷۷. Bazant, Z.P. (Ed.) Fracture mechanics of concrete structures. In Proceedings of the First International Conference on Fracture Mechanics of Concrete Structures (FraMCoS1), Part, I State-of-Art Report, Breckenridge, CO, USA, ۱-۵ June ۱۹۹۲; pp. ۱-۱۴۰.
۷۸. Golewski, G.L.; Sadowski, T. Macroscopic Evaluation of Fracture Processes in Fly Ash Concrete. *Sol. State. Phenom.* ۲۰۱۶, ۲۵۴, ۱۸۸-۱۹۳.



۷۹. Golewski, G.L.; Sadowski, T. A Study of Mode III Fracture Toughness in Young and Mature Concrete with Fly Ash Additive. *Sol. Stat. Phenom.* ۲۰۱۶, ۲۵۴, ۱۲۰-۱۲۵.
۸۰. Attiobe, E.K.; Darwin, D. Submicrocracking in Cement Paste and Mortar. *ACI Mater. J.* ۱۹۸۷, ۸۴, ۴۹۱-۵۰۰.
۸۱. Guo, Y.; Chen, X.; Wang, Z.; Ning, Y.; Bai, L. Identification of mixed mode damage types on rock-concrete interface under cyclic loading. *Int. J. Fat.* ۲۰۲۳, ۱۶۶, ۱۰۷۲۷۳.
۸۲. Barnat-Hunek, D.; Grzegorzczak-Frańczak, M.; Szymańska-Chargot, M.; Łagód, G. Effect of eco-friendly cellulose nanocrystals on physical properties of cement mortars. *Polymers* ۲۰۱۹, ۱۱, ۲۰۸۸.
۸۳. Zhang, P.; Han, S.; Golewski, G.L.; Wang, X. Nanoparticle-reinforced building materials with applications in civil engineering. *Adv. Mech. Eng.* ۲۰۲۰, ۱۲, ۱۶۸۷۸۱۴۰۲۰۹۶۵۴۳۸.
۸۴. Chen, H.; Liu, D. Fracture and damage properties of high-strength concrete under cyclic loading. *Constr. Build. Mater.* ۲۰۲۲, ۳۶۰, ۱۲۹۴۹۴.
۸۵. Zhang, P.; Han, X.; Guo, J.; Hu, S. High-temperature behavior of geopolymer mortar containing nano-silica. *Constr. Build. Mater.* ۲۰۲۳, ۳۶۴, ۱۲۹۹۸۳.
۸۶. Golewski, G.L. Combined Effect of Coal Fly Ash (CFA) and Nanosilica (nS) on the Strength Parameters and Microstructural Properties of Eco-Friendly Concrete. *Energies* ۲۰۲۳, ۱۶, ۴۵۲.
۸۷. Tu, Y.; Yu, H.; Ma, H.; Han, W.; Diao, Y. Experimental study of the relationship between bond strength of aggregates interface and microhardness of ITZ in concrete. *Constr. Build. Mater.* ۲۰۲۲, ۳۰۲, ۱۲۸۹۹۰.
۸۸. Naija, A.; Miled, K. Numerical study of the influence of W/C ratio and aggregate shape and size on the ITZ volume fraction in concrete. *Constr. Build. Mater.* ۲۰۲۲, ۳۰۱, ۱۲۸۹۰۰.
۸۹. Golewski, G.L. The Role of Pozzolanic Activity of Siliceous Fly Ash in the Formation of the Structure of Sustainable Cementitious Composites. *Sustain. Chem.* ۲۰۲۲, ۳, ۵۲۰-۵۳۴.
۹۰. Szeląg, M. Development of Cracking Patterns in Modified Cement Matrix with Microsilica. *Materials* ۲۰۱۸, ۱۱, ۱۹۲۸.
۹۱. Zhao, K.; Zhou, Y.; Yu, X.; Yan, Y.; He, Z.; Shan, P.; Zhang, X.; Ji, Y. Strain-Rate Effects on the Crack Evolution Pattern and Damage Characteristics of Cemented Paste Backfill. *Geotech. Geol. Eng.* ۲۰۲۲, ۴۱, ۲۹۵-۳۱۰.
۹۲. Hsu, T.C.T.; Slate, F.O.; Sturman, G.M.; Winter, G. Microcracking of Plain Concrete and the Shape of the Stress-Strain Curve. *ACI J.* ۱۹۶۳, ۶۰, ۲۰۹-۲۲۴.
۹۳. Beres, L. Fracture of Concrete Subjected to Cyclic and Sustained Loading. *ACI J.* ۱۹۷۱, ۶۹, ۳۰۴-۳۰۵.
۹۴. Goszczyńska, B. Analysis of the Process of Crack Initiation and Evolution in Concrete with Acoustic Emission Testing. *Arch. Civ. Mech. Eng.* ۲۰۱۴, ۱۴, ۱۳۴-۱۴۳.
۹۵. Gorzelańczyk, T.; Hoła, J. Stress Failure of Cement Concretes under Compression—Synthesis of Knowledge, Conclusions. *J. Civ. Eng. Manag.* ۲۰۱۵, ۲۱, ۱-۱۰.
۹۶. Hoła, J. Effects of Aggregate Grading on the Stress Degradation of Compressed Concrete. *Arch. Civ. Eng.* ۱۹۹۲, ۳۸, ۸۵-۱۰۱.
۹۷. Hoła, J. Studies on the Effect of Heat Treatment on Stress Produced in Compressed Concrete. *Eng. Trans.* ۱۹۹۲, ۴۰, ۳۵-۳۶.
۹۸. Hoła, J. Effect of Oiling up on the Failure of Concrete Determined by Acoustic Emission. *Arch. Acous.* ۱۹۹۶, ۲۱, ۲۱۵-۲۲۳.
۹۹. Błaszczyński, T.Z. Assessment of RC Structures Influenced by Crude Oil Products. *Arch. Civ. Mech. Eng.* ۲۰۱۱, ۱۱, ۵-۱۷.
۱۰۰. Hoła, J. Determination of Initiating and Critical Stress Levels in Compressed Plain and High-Strength Concrete by Acoustic Methods. *Arch. Acous.* ۲۰۰۰, ۲۵, ۵۷-۶۵.
۱۰۱. Gorzelańczyk, T. The Effect of Moisture Content on the Failure of Self-Compacting Concrete under Compression, as Assessed by Means of Acoustic Methods. *Arch. Civ. Mech. Eng.* ۲۰۱۱, ۱۱, ۴۵-۶۰.
۱۰۲. Zhang, P.; Gao, J.X.; Dai, X.B.; Zhang, T.H.; Wang, J. Fracture Behavior of Fly Ash Concrete Containing Silica Fume. *Struct. Eng. Mech.* ۲۰۱۶, ۵۹, ۲۶۱-۲۷۵.
۱۰۳. Gil, D.M.; Golewski, G.L. Effect of Silica Fume and Siliceous Fly Ash Addition on the Fracture Toughness of Plain Concrete in Mode I. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* ۲۰۱۸, ۴۱۶, ۰۱۲۰۶۵.



۱۰۴. Olivier, J.P. A Non Destructive Procedure to Observe Microcracks of Concrete by Scanning Electron Microscope. *Cem. Concr. Res.* ۱۹۸۵, ۱۵, ۱۰۵۵-۱۰۶۰.
۱۰۵. Ringot, E.; Olivier, J.P.; Maso, J.C. Characterisation of initial state of concrete with regard to microcracking. *Cem. Concr. Res.* ۱۹۸۷, ۱۷, ۴۱۱-۴۱۹.
۱۰۶. Ringot, E. Development of Map Cracking in Concrete under Compressive Loading. *Cem. Concr. Res.* ۱۹۸۸, ۱۸, ۹۳۳-۹۴۲.
۱۰۷. Alhassani, Y.; Bascoul, A.; Ringot, E. Microcrack Study of Cement-Based Materials by Means of Image Analysis. *Mater. Res. Soc.* ۱۹۹۴, ۳۷۰, ۴۳-۴۸.
۱۰۸. Xu, J.; Pu, H.; Sha, Z. Full-Field Deformation and Crack Development Evolution of Red Sandstone under Impact and Chemical Erosion. *Minerals* ۲۰۲۲, ۱۲, ۱۰۳۸.
۱۰۹. Mihashi, H.; Leite, J.P.D.B. State-of-the-Art on control of Cracking in Early Age Concrete. *J. Adv. Concr. Tech.* ۲۰۰۴, ۲, ۱۴۱-۱۵۴.
۱۱۰. Tang, T.; Zoolinger, D.G.; Yoo, R.H. Fracture Toughness of Concrete at Early Ages. *ACI Mater. J.* ۱۹۹۳, ۹۰, ۴۶۳-۴۷۱.
۱۱۱. Tang, T.; Zoolinger, D.G.; Yoo, R.H. Fracture Energy of Concrete at Early Ages. *Mater. Struct.* ۱۹۹۷, ۳۰, ۶۷-۷۱.
۱۱۲. Kaszyńska, M. Early Age Properties of High-Strength/High-Performance Concrete. *Cem. Concr. Compos.* ۲۰۰۲, ۲۴, ۲۵۳-۲۶۱.
۱۱۳. Alamayreh, M.I.; Alahmer, A.; Younes, M.B.; Bazlamit, S.M. Pre-Cooling Concrete System in Massive Concrete Production: Energy Analysis and Refrigerant Replacement. *Energies* ۲۰۲۲, ۱۵, ۱۱۲۹.
۱۱۴. Ma, Z.; Shi, C.; Wu, H.; Liu, S. Structural Behavior of Massive Reinforced Concrete Structures Exposed to Thermomechanical Loads. *Energies* ۲۰۲۲, ۱۵, ۲۶۷۱.
۱۱۵. Golewski, G.L.; Sadowski, T. Experimental Investigation and Numerical Modeling Fracture Processes in Fly Ash Concrete at Early Age. *Solid State Phenom.* ۲۰۱۲, ۱۸۸, ۱۵۸-۱۶۳.
۱۱۶. Radlińska, A.; Kaszyńska, M.; Zieliński, A.; Ye, H. Early-Age Cracking of Self-Consolidating Concrete with Lightweight and Normal Aggregates. *J. Mater. Civ. Eng.* ۲۰۱۸, ۳۰, ۰۴۰۱۸۲۴۲.
۱۱۷. Szostak, B.; Golewski, G.L. Rheology of Cement Pastes with Siliceous Fly Ash and the C-S-H Nano-Admixture. *Materials* ۲۰۲۱, ۱۴, ۳۶۴۰.
۱۱۸. Kaszyńska, M. Heat of Hydration and Strength Development in High-Performance Concretes. *Arch. Civ. Eng.* ۱۹۹۸, ۴۴, ۱۹۹-۲۱۴.
۱۱۹. Report, C.S. *Non-Structural Cracks in Concrete*; Technical Report no. ۲۲; Concrete Society: London, UK, ۱۹۹۲.
۱۲۰. Basista, M.; Gross, D. The Sliding Crack Model of Brittle Deformation: An Internal Variable Approach. *Int. J. Sol. Struct.* ۱۹۹۸, ۳۵, ۴۸۷-۵۰۹.
۱۲۱. Szeląg, M. Evaluation of cracking patterns in cement composites—From basics to advances: A review. *Materials* ۲۰۲۰, ۱۳, ۲۴۹۰.
۱۲۲. Lyrtzakakis, A.; Tsompanakis, Y.; Psarropoulos, P.N. Efficient Mitigation of High-Speed Train Vibrations on Adjacent Reinforced Concrete Buildings. *Constr. Build. Mater.* ۲۰۲۲, ۳۱۴, ۱۲۵۶۵۳.
۱۲۳. Golewski, G.L. A New Principles for Implementation and Operation of Foundations for Machines: A Review of Recent Advances. *Struct. Eng. Mech.* ۲۰۱۹, ۷۱, ۳۱۷-۳۲۷.
۱۲۴. Park, S.; Beak, J.; Kim, K.; Park, Y.-J. Study on Reduction Effect of Vibration Propagation due to Internal Explosion Using Composite Materials. *Int. J. Concr. Struct. Mater.* ۲۰۲۱, ۱۵, ۳۰.
۱۲۵. Golewski, G.L. On the Special Construction and Materials Conditions Reducing the Negative Impact of Vibrations on Concrete Structures. *Mater. Today Procs.* ۲۰۲۰, ۴۵, ۴۳۴۴-۴۳۴۸.
۱۲۶. Wang, R.; Wu, H.; Zhao, M.; Liu, Y.; Chen, C. The Classification and Mechanism of Microcrack Homogenization Research in Cement Concrete Based on X-ray CT. *Buildings* ۲۰۲۲, ۱۲, ۱۰۱۱.
۱۲۷. Abrishami, H.H.; Mitchell, D. Influence of Splitting Cracks on Tension Stiffening. *Struct. J.* ۱۹۹۶, ۹۳, ۷۰۳-۷۱۰.
۱۲۸. Coronelli, D.; Mulas, M.G. Modeling of shear behavior in reinforced concrete. *ACI Struct. J.* ۲۰۰۶, ۱۰۳, ۳۷۲-۳۸۴.





۱۲۹. Mehdizadeh, M.; Maghshenas, A.; Khosnari, M.M. On the Effect of Internal Friction on Torsional and Axial Cyclic Loading. *Inter. J. Fat.* ۲۰۲۱, ۱۴۵, ۱۰۶۱۱۳
۱۳۰. Bascoul, A.; Turatsinze, A. Microstructural Characterization of Mode I Crack Opening in Mortar. *Mater. Struct.* ۱۹۹۴, ۲۷, ۷۱-۷۸.
۱۳۱. Golewski, G.L. Effect of Fly Ash Addition on the Fracture Toughness of Plain Concrete at Third Model of Fracture. *J. Civ. Eng. Manag.* ۲۰۱۷, ۲۳, ۶۱۳-۶۲۰.
۱۳۲. Golewski, G.L. Determination of Fracture Toughness in Concretes Containing Siliceous Fly Ash During Mode III Loading. *Struct. Eng. Mech.* ۲۰۱۷, ۶۲, ۱-۹.
۱۳۳. Li, V.C. From Micromechanics to Structural Engineering—The Design of Cementitious Composites for Civil Engineering Applications. *J. Struct. Mech. Earth. Eng.* ۱۹۹۳, ۱۰, ۳۷-۴۸.
۱۳۴. Szostak, B.; Golewski, G.L. Effect of Nano Admixture of CSH on Selected Strength Parameters of Concrete Including Fly Ash. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* ۲۰۱۸, ۴۱۶, ۰۱۲۱۰۵.
۱۳۵. Dragas, J.; Marinkovic, S.; Ignjatovic, I.; Tomic, N.; Kokovic, V. Flexural behaviour and ultimate bending capacity of high-volume fly ash reinforced concrete beams. *Eng. Struct.* ۲۰۲۳, ۲۷۷, ۱۱۵۴۴۶.
۱۳۶. Ziari, A.; Kianoush, M.R. Investigation of Direct Tension Cracking and Leakage in RC Elements. *Eng. Struct.* ۲۰۰۹, ۳۱, ۴۶۶-۴۷۴.
۱۳۷. Ahmadi, A.; Reza Kianoush, M.; Moslemi, M.; Lachemi, M.; Siad, H.; Booya, E. Investigation on Repair of Tension Cracks in Reinforced Concrete Panels. *Eng. Struct.* ۲۰۲۱, ۲۴۵, ۱۱۲۹۷۴.
۱۳۸. Borosnyói, A.; Balázs, G. Models for Flexural Cracking in Concrete: The State of The Art. *Struct. Concr.* ۲۰۰۵, ۶, ۵۳-۶۲.
۱۳۹. Lopes, A.V.; Lopes, S.M.R.; do Carmo, R.N.F. Stiffness of Reinforced Concrete Slabs Subjected to Torsion. *Mater. Struct.* ۲۰۱۴, ۴۷, ۲۲۷-۲۳۸.
۱۴۰. Golewski, G.L. A Novel Specific Requirements for Materials used in Reinforced Concrete Composites Subjected to Dynamic Loads. *Compos. Struct.* ۲۰۱۹, ۲۲۳, ۱۱۰۹۳۹.
۱۴۱. Charan Behera, G.; Gunneswara Rao, T.D.; Rao, C.B.K. Torsional Capacity of High Strength Concrete Beams Jacketed with Ferrocement U-Wraps. *As. J. Civ. Eng. (Build. Hous.)* ۲۰۰۸, ۹, ۴۱۱-۴۲۲.
۱۴۲. El-Mandouh, M.A.; Hu, J.W.; Shim, W.S.; Abdelazeem, F.; ELSamak, G. Torsional Improvement of RC Beams Using Various Strengthening Systems. *Buildings* ۲۰۲۲, ۱۲, ۱۷۷۶.
۱۴۳. Bazant, Z.P.; Prat, P.C. Measurement of Mode III Fracture Energy of Concrete. *Nucl. Eng. Des.* ۱۹۸۸, ۱۰۶, ۱-۸.
۱۴۴. Bazant, Z.P.; Prat, P.C.; Tabbara, M.R. Antiplane Shear Fracture Tests (Mode III). *ACI Mater. J.* ۱۹۹۰, ۸۷, ۱۲-۱۹.
۱۴۵. Yang, Z.; Li, H.; Wen, J.; Huang, F.; Wang, Z.; Yi, Z.; Xie, Y.; Dong, H. The Microstructure Evolution of Ballastless Track High-Strength Concrete Exposed to Compressive and Flexural Fatigue Loads. *Inter. J. Fat.* ۲۰۲۳, ۱۶۶, ۱۰۷۲۴۷.
۱۴۶. Vaziri, A.; Nayeb-Hashemi, H. The Effect of Crack Surface Interaction on the Stress Intensity Factor in Mode III Crack Growth in Round Shafts. *Eng. Frac. Mech.* ۲۰۰۵, ۷۲, ۶۱۷-۶۲۹.
۱۴۷. Reardon, A.C.; Quesnel, D.J. Fracture Surface Interference Effects in Mode III. *Mech. Mater.* ۱۹۹۵, ۱۹, ۲۱۳-۲۲۶.
۱۴۸. Mohan, A.; Poobal, S. Crack detection using image processing: A critical review and analysis. *Alex. Eng. J.* ۲۰۱۸, ۵۷, ۷۸۷-۷۹۸.
۱۴۹. Szeląg, M. The Application of NDT Techniques to Examination of Thermally-Induced Cracking Patterns of Brick Powder-Portland Cement Matrix. *Dev. Built Environ.* ۲۰۲۲, ۱۲, ۱۰۰۱۰۴.
۱۵۰. Büyüköztürk, O. I s. *NDT E Int.* ۱۹۹۸, ۳۱, ۲۳۳-۲۴۳.
۱۵۱. EN ۱۹۹۲-۱-۱: ۲۰۰۴; Eurocode ۲: Design of concrete structures—Part ۱-۱: General Rules and Rules for Buildings. British Standards Institution (BSI): London, UK, ۲۰۰۴.
۱۵۲. Aggelis, D.G.; Kordatos, E.Z.; Strantza, M.; Soulioti, D.V.; Matikas, T.E. NDT Approach for Characterization of Subsurface Cracks in Concrete. *Constr. Build. Mater.* ۲۰۱۱, ۲۵, ۳۰۸۹-۳۰۹۷.
۱۵۳. Maierhofer, C.; Brink, A.; Rollig, M.; Wiggenhauser, H. Quantitative Impulse-Thermography as Non-Destructive Testing Method in Civil Engineering—Experimental Results and Numerical Simulations. *Constr. Build. Mater.* ۲۰۰۵, ۱۹, ۷۳۱-۷۳۷.



۱۵۴. Barreira, E.V.; de Freitas, V.P. Evaluation of Building Materials Using Infrared Thermography. *Constr. Build. Mater.* ۲۰۰۷, ۲۱, ۲۱۸-۲۲۴.
۱۵۵. Aljagoub, D.; Na, R.; Cheng, C.; Shen, Z. Performance Evaluation of Uncooled UAV Infrared Camera in Detecting Concrete Delamination. *Infrastructures* ۲۰۲۲, ۷, ۱۶۳.
۱۵۶. Alhammad, M.; Avdelidis, N.P.; Ibarra-Castaneda, C.; Torbali, M.E.; Genest, M.; Zhang, H.; Zolotas, A.; Maldague, X.P.V. Automated Impact Damage Detection Technique for Composites Based on Thermographic Image Processing and Machine Learning Classification. *Sensors* ۲۰۲۲, ۲۲, ۹۰۳۱.
۱۵۷. Fox, M.; Coley, D.; Goodhew, S.; De Wilde, P. Time-Lapse Thermography for Building Defect Detection. *Energy Build.* ۲۰۱۵, ۹۲, ۹۵-۱۰۶.
۱۵۸. Tashan, J.; Al-Mahaidi, R. Detection of Cracks in Concrete Strengthened with CFRP Systems Using Infra-Red Thermography. *Compos. Part B* ۲۰۱۴, ۶۴, ۱۱۶-۱۲۵.
۱۵۹. Nobile, R.; Panella, F.W.; Pirinu, A.; Saponaro, A. Full-Field Monitoring Methods for Damage Analysis on Aeronautical CFRP Specimens under Fatigue Loads. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* ۲۰۲۲, ۱۲۱۴, ۰۱۲۰۰۸.
۱۶۰. Róžański, L.; Ziopaja, K. Detection of Material Defects in Reinforced Concrete Slab Using Active Thermography. *Meas. Autom. Monitor.* ۲۰۱۷, ۶۳, ۸۲-۸۵.
۱۶۱. Saleh, A.K.; Sakka, Z.; Almuhan, H. The Application of Two-Dimensional Continuous Wavelet Transform Based on Active Infrared Thermography for Subsurface Defect Detection in Concrete Structures. *Buildings* ۲۰۲۲, ۱۲, ۱۹۶۷.
۱۶۲. Barišić, I.; Dokšanović, T.; Zvonarić, M. Pavement Structure Characteristics and Behaviour Analysis with Digital Image Correlation. *Appl. Sci.* ۲۰۲۳, ۱۳, ۶۶۴.
۱۶۳. Fayyad, T.M.; Lees, J.M. Application of Digital Image Correlation to Reinforced Concrete Fracture. *Procedia Mater. Sci.* ۲۰۱۴, ۳, ۱۵۸۵-۱۵۹۰.
۱۶۴. Loukidis, A.; Pasiou, E.D.; Sarlis, N.V.; Triantis, D. Fracture Analysis of Typical Construction Materials in Natural Time. *Phys. A Stat. Mech. Its Appl.* ۲۰۲۰, ۵۴۷, ۱۲۳۸۳۱.
۱۶۵. Babaeian, M.; Mohammadimehr, M. Investigation of the Time Elapsed Effect on Residual Stress Measurement in a Composite Plate by DIC Method. *Opt. Las. Eng.* ۲۰۲۰, ۱۲۸, ۱۰۶۰۰۲.
۱۶۶. Yang, L.; Hou, C.; Zhu, W.; Liu, X.; Yan, B.; Li, L. Monitoring the Failure Process of Cemented Paste Backfill at Different Curing Times by Using a Digital Image Correlation Technique. *Constr. Build. Mater.* ۲۰۲۲, ۳۴۶, ۱۲۸۴۸۷.
۱۶۷. Zhu, X.; Chen, X.; Bai, Y.; Ning, Y.; Zhang, W. Evaluation of fracture behavior of high-strength hydraulic concrete damaged by freeze-thaw cycle test. *Constr. Build. Mater.* ۲۰۲۲, ۳۲۱, ۱۲۶۳۴۶.
۱۶۸. Golewski, G.L. Comparative Measurements of Fracture Toughness Combined with Visual Analysis of Cracks Propagation Using the DIC Technique of Concretes Based on Cement Matrix with a Highly Diversified Composition. *Theor. Appl. Fract. Mech.* ۲۰۲۲, ۱۲۱, ۱۰۳۵۵۳.
۱۶۹. Fayyad, T.M.; Lees, J.M. Experimental investigation of crack propagation and crack branching in lightly reinforced concrete beams using digital image correlation. *Eng. Fract. Mech.* ۲۰۱۷, ۱۸۲, ۴۸۷-۵۰۵.
۱۷۰. Hamrat, M.; Boulekbache, B.; Chemrouk, M.; Amziane, S. Flexural Cracking Behavior of Normal Strength, High Strength Fiber Concrete Beams, Using Digital Image Correlation Technique. *Constr. Build. Mater.* ۲۰۱۶, ۱۰۶, ۶۷۸-۶۹۲.
۱۷۱. Li, D.; Huang, P.; Chen, Z.; Yao, G.; Guo, X.; Zheng, X.; Yang, Y. Experimental Study on Fracture and Fatigue Crack Propagation Processes in Concrete Based on DIC Technology. *Eng. Fract. Mech.* ۲۰۲۰, ۲۳۵, ۱۰۷۱۶۶.
۱۷۲. Golewski, G.L. Evaluation of Fracture Processes under Shear with the Use of DIC Technique in Fly Ash Concrete and Accurate Measurement of Crack Paths Lengths with the Use of a New Crack Tip Tracking Method. *Measurement* ۲۰۲۱, ۱۸۱, ۱۰۹۶۳۲.
۱۷۳. Glinicki, M.A.; Litorowicz, A. Crack System Evaluation in Concrete Elements at Mesoscale. *Bull. Pol. Acad. Sci. Technol. Sci.* ۲۰۰۶, ۵۴, ۳۷۱-۳۷۹.
۱۷۴. Qu, Z.; Jiang, P.; Zhang, W. Development and Application of Infrared Thermography Non-destructive Testing Techniques. *Sensors* ۲۰۲۰, ۲۰, ۳۸۵۱



۱۷۵. Blikharsky, Y.; Koptika, N.; Khmil, R.; Selejdak, J.; Blikharsky, Z. Review of Development and Application of Digital Image Correlation Method for Study of Stress-Strain State of RC Structures. *Appl. Sci.* ۲۰۲۲, ۱۲, ۱۰۱۵۷.
۱۷۶. Brandt, A.M. *Cement-Based Composites: Materials, Mechanical Properties and Performance*, ۲nd ed.; Taylor and Francis: London, UK, ۲۰۰۹.
۱۷۷. Maji, A.K. Review of Noninvasive Techniques for Detecting Microfracture. *Adv. Cem. Based Mater.* ۱۹۹۵, ۲, ۲۰۱-۲۰۹.
۱۷۸. Elagra, H.; Godin, N.; Peix, G.; Mili, M.R.; Fantozzi, G. Damage Evolution Analysis in Mortar, During Compressive Loading Using Acoustic Emission and X-ray Tomography: Effects of the Sand/Cement Ratio. *Cem. Concr. Res.* ۲۰۰۷, ۳۷, ۷۰۳-۷۱۳.
۱۷۹. Martz, H.E.; Schneberk, D.J.; Roberson, G.P.; Monteiro, P.J.M. Computerized tomography analysis of reinforced concrete. *ACI Mater. J.* ۱۹۹۳, ۹۰, ۲۵۹-۲۶۳.
۱۸۰. Monteiro, P.J.M.; Pichot, C.Y.; Belkebir, K. Computer Tomography of Reinforced Concrete, Chapter ۱۲. In *Materials Science of Concrete V.*; Skalny, J., Mindess, S., Eds.; The American Ceramic Society: Westerville, FL, USA, ۱۹۹۸; pp. ۵۳۷-۵۷۲.
۱۸۱. Morgan, I.L.; Ellinger, H.; Klinskiak, R.; Neils Thomson, J. Examination of concrete by computerized tomography. *ACI Mater. J.* ۱۹۸۰, ۷۷, ۲۳-۲۷.
۱۸۲. Suzuki, T.; Ogata, H.; Takada, R.; Aoki, M.; Ohtsu, M. Use of acoustic emission and X-ray computed tomography for damage evaluation of freeze-thawed concrete. *Constr. Build. Mater.* ۲۰۱۰, ۲۴, ۲۳۴۷-۲۳۵۲.
۱۸۳. Younga, J.J.; Szomolanyia, P.; Bremnerb, T.W.; Balcoma, B.J. Magnetic resonance imaging of crack formation in hydrated cement paste materials. *Cem. Concr. Res.* ۲۰۰۴, ۳۴, ۱۴۵۹-۱۴۶۶.
۱۸۴. Jones, S.Z.; Bentz, D.P.; Davis, J.M.; Hussey, D.S.; Jacobson, D.L.; Molloy, J.L.; Sieber, J.R. Measurement and Modeling of the Ability of Crack Fillers to Prevent Chloride Ingress into Mortar. *Cem. Concr. Compos.* ۲۰۱۷, ۸۱, ۱۰۹-۱۲۱.
۱۸۵. Slate, F.O.; Olsefski, S. X-rays for Study of Internal Structure and Microcracking of Concrete. *ACI J.* ۱۹۶۳, ۶۰, ۵۷۵-۵۸۷.
۱۸۶. Chen, H.; Niu, J.; Zhai, M. Characteristics of the Fracture Process Zone for Reservoir Rock with Various Heterogeneity. *Energies* ۲۰۲۲, ۱۵, ۸۳۳۲.
۱۸۷. Otsuka, K.; Date, H. Fracture Process Zone in Concrete Tension Specimen. *Eng. Fract. Mech.* ۲۰۰۰, ۶۵, ۱۱۱-۱۳۱.
۱۸۸. Najjar, W.S. *The Development and Application of Neutron Radiography to Study Concrete, with Emphasis on Microcracking*; Cornell University: Ithaca, NY, USA, ۱۹۸۷.
۱۸۹. Najjar, W.S.; Aderhold, H.C.; Hover, K.C. The Application of Neutron Radiography to Study of Microcracking in Concrete. *Cem. Concr. Aggr.* ۱۹۸۶, ۸, ۱۰۳-۱۰۹.
۱۹۰. Najjar, W.S.; Hover, K.C. Neutron Radiography for Microcrack Studies of Concrete Cylinders Subjected to Concentric and Eccentric Compressive Loads. *ACI Mater. J.* ۱۹۸۹, ۸۶, ۳۵۴-۳۵۹.
۱۹۱. Pugliesi, R.; Andrade, M.L.G. Study of Cracking in Concrete by Neutron Radiography. *Appl. Rad. Is.* ۱۹۹۷, ۴۸, ۳۳۹-۳۴۴.
۱۹۲. Justnes, H.; Bryhn-Ingebrigsten, K.; Rosvold, G.O. Neutron Radiography: An Excellent Method of Measuring Water Penetration and Moisture in Cementitious Materials. *Adv. Cem. Res.* ۱۹۹۴, ۶, ۶۷-۷۲.
۱۹۳. Kanematsu, M.; Maruyama, I.; Noguchi, T.; Iikura, H.; Tsuchiya, N. Quantification of Water Penetration into Concrete through Cracks by Neutron Radiography. *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A* ۲۰۰۹, ۶۰۵, ۱۵۴-۱۵۸.
۱۹۴. Golewski, G.L. An Assessment of Microcracks in the Interfacial Transition Zone of Durable Concrete Composites with Fly Ash Additives. *Compos. Struct.* ۲۰۱۸, ۲۰۰, ۵۱۵-۵۲۰.
۱۹۵. Golewski, G.L. The Beneficial Effect of the Addition of Fly Ash on Reduction of the Size of Microcracks in the ITZ of Concrete Composites under Dynamic Loading. *Energies* ۲۰۲۱, ۱۴, ۶۶۸.
۱۹۶. Nemati, K.M. Fracture Analysis of Concrete Using Scanning Electron Microscopy. *Scanning* ۱۹۹۷, ۱۹, ۴۲۶-۴۳۰.
۱۹۷. Pospíšil, K.; Frýbort, A.; Kratochvíl, A.; Macháčková, J. Scanning Electron Microscopy Method as a Tool for the Evaluation of Selected Materials Microstructure. *Trans. Trans. Sci.* ۲۰۰۸, ۱, ۱۳-۲۰.



۱۹۸. Prokopski, G.; Halbiniak, J. Interfacial Transition Zone in Cementitious Materials. *Cem. Concr. Res.* ۲۰۰۰, ۳۰, ۵۷۹-۵۸۳.
۱۹۹. Łowińska-Kluge, A.; Józwiak, K. A study of the Resistance of Concrete to Corrosion using SEM and Microanalysis. *Micros. Anal.* ۲۰۰۶, ۲۰, ۹-۱۱.
۲۰۰. Gatty, L.; Bonnamy, S.; Felessoufi, A.; Clinard, C.; Richard, P.; van Damme, H. A Transmission Electron Microscopy Study of Interfaces and Matrix Homogeneity in Ultra-High-Performance Cement-Based Materials. *J. Mater. Sci.* ۲۰۰۱, ۳۶, ۴۰۱۳-۴۰۲۶.
۲۰۱. Ouyang, Q.; Xie, Z.; Liu, J.; Gong, M.; Yu, H. Application of Atomic Force Microscopy as Advanced Asphalt Testing Technology: A Comprehensive Review. *Polymers* ۲۰۲۲, ۱۴, ۲۸۵۱.
۲۰۲. Shi, C.; Qian, B.; Wang, Q.; Zunino, F.; Zhao, J.; Shen, X. Structure analysis of beta dicalcium silicate via scanning transmission electron microscope (STEM). *Constr. Build. Mater.* ۲۰۲۲, ۳۴۸, ۱۲۸۷۲.
۲۰۳. Rybczynski, S.; Schaan, G.; Dosta, M.; Ritter, M.; Schmidt-Döhl, F. Discrete Element Modeling and Electron Microscopy Investigation of Fatigue-Induced Microstructural Changes in Ultra-High-Performance Concrete. *Materials* ۲۰۲۱, ۱۴, ۶۳۳۷.
۲۰۴. Rybczyński, S.; Dosta, M.; Schaan, G.; Ritter, M.; Schmidt-Döhl, F. Numerical Study on the Mechanical Behavior of Ultrahigh Performance Concrete using a Three-Phase Discrete Element Model. *Struct. Concr.* ۲۰۲۲, ۲۳, ۵۴۸-۵۶۳.
۲۰۵. Gao, Z.; Lei, D.; Chen, H.; He, J.; Kong, E.; Xu, Y. Characterization of Interfacial Transition Zone of Fly Ash Concrete with Different Coarse-Aggregates by Optical Microscopy and Digital Image Correlation Coupled Method. *Mater. Today Comm.* ۲۰۲۳, ۳۴, ۱۰۵۰۹۹.
۲۰۶. Ohtsu, M.; Shigeishi, M.; Sakata, Y. Nondestructive Evaluation of Defects in Concrete by Quantitative Acoustic Emission and Ultrasonics. *Ultrasonics* ۱۹۹۸, ۳۶, ۱۸۷-۱۹۰.
۲۰۷. Van Hauwaert, A.; Thimus, J.-F.; Delannay, F. Use of Ultrasonic to Follow Crack Growth. *Ultrasonics* ۱۹۹۸, ۳۶, ۲۰۹-۲۱۷.
۲۰۸. Green, A.T. Stress Wave Emission and Fracture of Pre-stressed Concrete Reactor Vessel Materials. In *Second Inter-American Conference on Materials Technology*; Technical Report, DRC-۷۳-۲; ASME: New York, NY, USA; Mexico City, Mexico, ۱۹۷۰; Livermore, CA, USA, ۱۹۷۱; Volume ۱, pp. ۶۳۰-۶۴۹.
۲۰۹. Broniewski, T.; Hoła, J.; Śliwiński, J. Application of the Method of Acoustic Emission for Evaluation of Behavior of Polymer Impregnated Concrete under Compressive Load. *Mater. Struct.* ۱۹۹۴, ۲۷, ۲۳۱-۲۳۷. (In French)
۲۱۰. Quyang, C.; Landis, E.; Shah, S.P. Detection of Microcracking in Concrete by Acoustic Emission. *Exp. Tech.* ۱۹۹۱, ۱۵, ۲۴-۲۸.
۲۱۱. Hua, S.; Lu, J.; Xiao, F. Evaluation of Concrete Fracture Procedure Based on Acoustic Emission Parameters. *Constr. Build. Mater.* ۲۰۱۳, ۴۷, ۱۲۴۹-۱۲۵۶.
۲۱۲. Lu, J.; Zhou, Z.; Chen, X.; Wang, P.; Rui, Y.; Cai, X. Experimental Investigation on Mode I Fracture Characteristics of Rock-Concrete Interface at Different Ages. *Constr. Build. Mater.* ۲۰۲۲, ۳۴۹, ۱۲۴۹-۱۲۸۷۳۰.
۲۱۳. Haneef, T.K.; Kumari, K.; Mukhopadhyay, C.K.; Rao, B.P.; Jayakumar, T. Influence of Fly Ash and Curing on Cracking Behavior of Concrete by Acoustic Emission Technique. *Constr. Build. Mater.* ۲۰۱۳, ۴۴, ۳۴۲-۳۵۰.
۲۱۴. Aggelis, D.G. Classification of Cracking Mode in Concrete by Acoustic Emission Parameters. *Mater. Res. Comm.* ۲۰۱۱, ۳۸, ۱۵۳-۱۵۷.
۲۱۵. Ohtsu, M.; Okamoto, T.; Yuyama, S. Moment Tensor Analysis of Acoustic Emission for Cracking Mechanisms in Concrete. *ACI Struct. J.* ۱۹۹۸, ۹۵, ۸۷-۹۵.
۲۱۶. Jacquot, P.; Rastogi, P.K. Speckle Metrology and Holographic Interferometry Applied to the Study of Cracks in Concrete. In *Fracture Mechanics of Concrete*; Wittmann, F.H., Ed.; Elsevier Science Publishers: Amsterdam, The Netherlands, ۱۹۸۳; pp. ۱۱۳-۱۵۰.
۲۱۷. Hansen, E.A. A Holographic Real Time Study of Crack Propagation in Concrete. *Cem. Concr. Res.* ۱۹۸۹, ۱۹, ۶۱۱-۶۲۰.
۲۱۸. Maji, A.K.; Shah, S.P. Application of Acoustic Emission and Laser Holography to Study Microfracture of Concrete. *Spec. Publ.* ۱۹۸۹, ۱۱۲, ۸۳-۱۰۹.



۲۱۹. Maji, A.K.; Wang, J.; Lovato, J. Electronic Speckle Pattern Interferometry for Fracture Mechanics Testing. *Exp. Tech.* ۱۹۹۱, ۱۵, ۱۹-۲۳.
۲۲۰. Nemati, K.M.; Stroeven, P. Stereological Analysis of Micromechanical Behavior of Concrete. *Mater. Struct.* ۲۰۰۱, ۳۴, ۴۸۶-۴۹۴.
۲۲۱. Satoh, A.; Yamada, K.; Ishiyama, S. Experimental Study on Major Parameters of Fractography for Concrete. *J. Struct. Constr. Eng. (Trans. AIJ)* ۲۰۱۴, ۷۹, ۴۳۷-۴۴۴.
۲۲۲. Hornain, H.; Marchand, J.; Ammouche, A.; Commbe, J.P.; Moranville, M. Microscopic Observation of Cracks in Concrete—A New Sample Preparation Technique Using Dye Impregnation. *Cem. Concr. Res.* ۱۹۹۶, ۲۶, ۵۷۳-۵۸۳.
۲۲۳. Szeląg, M. Fractal characterization of thermal cracking patterns and fracture zone in low-alkali cement matrix modified with microsilica. *Cem. Concr. Compos.* ۲۰۲۰, ۱۱۴, ۱۰۳۷۳۲.
۲۲۴. Dobeš, P.; Lokaj, A.; Vavrušová, K. Stiffness and Deformation Analysis of Cross-Laminated Timber (CLT) Panels Made of Nordic Spruce Based on Experimental Testing, Analytical Calculation and Numerical Modeling. *Buildings* ۲۰۲۳, ۱۳, ۲۰۰.
۲۲۵. Zhang, H.; Li, S.; Chen, Z.; Tong, Y.; Li, Z.; Wang, S. Fracture Mechanism of Crack-Containing Strata under Combined Static and Harmonic Dynamic Loads Based on Extended Finite Elements. *Energies* ۲۰۲۲, ۱۵, ۷۹۴۰.
۲۲۶. Alhassan, M.; Betoush, N.; Al-Huthaifi, N.; Al Dalou, A. Estimation of the Fracture Parameters of Macro Fiber-Reinforced Concrete Based on Nonlinear Elastic Fracture Mechanics Simulations. *Res. Eng.* ۲۰۲۲, ۱۵, ۱۰۰۵۳۹.
۲۲۷. Tran, N.T.; Nguyen, T.K.; Nguyen, D.-L.; Le, Q.H. Assessment of Fracture Energy of Strain-Hardening Fiber-Reinforced Cementitious Composite Using Experiment and Machine Learning Technique. *Struct. Concr.* ۲۰۲۲.
۲۲۸. Park, M.J.; Kim, J.; Jeong, S.; Jang, A.; Bae, J.; Ju, Y.K. Machine Learning-Based Concrete Crack Depth Prediction Using Thermal Images Taken under Daylight Conditions. *Remote Sens.* ۲۰۲۲, ۱۴, ۲۱۵۱.
۲۲۹. Altun, F.; Kisi, O.; Aydin, K. Predicting the Compressive Strength of Steel Fiber Added Lightweight Concrete Using Neutral Network. *Comp. Mater. Sci.* ۲۰۰۸, ۴۲, ۲۵۹-۲۶۵.
۲۳۰. Breiman, L. Random Forests. *Mach. Learn.* ۲۰۰۱, ۴۵, ۵-۳۲.
۲۳۱. Cheng, M.-Y.; Firdausi, P.-M.; Prayogo, D. High-performance Concrete Compressive Strength Prediction Using Genetic Weighted Pyramid Operation Tree (GW POT). *Eng. Appl. Art. Int.* ۲۰۱۴, ۲۹, ۱۰۴-۱۱۳.
۲۳۲. Cheng, M.-Y.; Wibowo, D.K.; Prayogo, D.; Roy, A.F.V. Predicting Productivity Loss Caused by Change Orders Using the Evolutionary Fuzzy Support Vector Machine Interference Model. *J. Civ. Eng. Manag.* ۲۰۱۵, ۲۱, ۸۸۱-۸۹۲.
۲۳۳. Goetzke-Pala, A.; Hoła, A.; Sadowski, Ł. A non-destructive method of the evaluation of the moisture in saline brick walls using artificial neural networks. *Arch. Civ. Mech. Eng.* ۲۰۱۸, ۱۸, ۱۷۲۹-۱۷۴۲.
۲۳۴. Rycroft, S.; Shaw, A.; Fergus, P.; Kot, P.; Hashim, K.; Moody, A.; Conway, L. A First Implementation of Underwater Communications in Raw Water Using the ۴۳۳ MHz Frequency Combined with a Bowtie Antenna. *Sensors* ۲۰۱۹, ۱۹, ۱۸۱۳.
۲۳۵. Maierhofer, C. Nondestructive Evaluation of Concrete Infrastructure with Ground Penetrating Radar. *J. Mater. Civ. Eng.* ۲۰۰۳, ۱۵, ۲۸۷-۲۹۷.
۲۳۶. Zaki, A.; Chai, H.K.; Aggelis, D.G.; Alver, N. Non-Destructive Evaluation for Corrosion Monitoring in Concrete: A Review and Capability of Acoustic Emission Technique. *Sensors* ۲۰۱۵, ۱۵, ۱۹۰۶۹-۱۹۱۰۱.
۲۳۷. Gupta, B.D. *Fiber Optic Sensors: Principles and Applications*; New India Publishing: New Delhi, India, ۲۰۰۶.
۲۳۸. Khuc, T.; Catbas, F.N. Completely Contactless Structural Health Monitoring of Real-Life Structures Using Cameras and Computer Vision. *Struct. Control Health Monit.* ۲۰۱۷, ۲۴, e۱۸۵۲.
۲۳۹. Xu, Y.; Hwang, S.; Wang, Q.; Kim, D.; Luo, C.; Yang, J.; Sohn, H. Laser Active Thermography for Debonding Detection in FRP Retrofitted Concrete Structures. *NDT E Int.* ۲۰۲۰, ۱۱۴, ۱۰۲۲۸۵.
۲۴۰. Kot, P.; Muradov, M.; Gkantou, M.; Kamaris, G.S.; Hashim, K.; Yeboah, D. Recent Advancements in Non-Destructive Testing Techniques for Structural Health Monitoring. *Appl. Sci.* ۲۰۲۱, ۱۱, ۲۷۵۰.



# ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر



ISSN ۲۹۸۰-۷۷۸۶

۲۴۱. Ringot, E.; Bascoul, A. About the Analysis of Microcracking in Concrete. *Cem. Concr. Compos. SI Image Anal.* ۲۰۰۱, ۲۳, ۲۶۱-۲۶۶.
۲۴۲. Raju, N.K. Microcracking in Concrete under Repeated Compressive Loads. *Build. Sci.* ۱۹۷۰, ۵, ۵۱-۵۶.
۲۴۳. Zeng, H.; Li, W.; Jin, M.; Zhang, J.; Ma, Y.; Lu, C.; Liu, J. Deterioration of Performances and Structures of Cement Pastes under the Action of Thermal Cycling Fatigue. *Inter. J. Fat.* ۲۰۲۲, ۱۶۵, ۱۰۷۱۸۱.
۲۴۴. Wang, S.; Hu, S. Experimental Study of Crack Propagation in Cracked Concrete. *Energies* ۲۰۱۹, ۱۲, ۳۸۵۴.
۲۴۵. Xu, X.; Jin, Z.; Yu, Y.; Li, N. Damage Source and its Evolution of Ultra-High Performance Concrete Monitoring by Digital Image Correlation and Acoustic Emission Technologies. *J. Buil. Eng.* ۲۰۲۳, ۶۵, ۱۰۵۷۳۴.
۲۴۶. Ongpeng, J.M.C.; Oreta, A.W.C.; Hirose, S. Monitoring Damage Using Acoustic Emission Source Location and Computational Geometry in Reinforced Concrete Beams. *Appl. Sci.* ۲۰۱۸, ۸, ۱۸۹.
۲۴۷. Alam, S.Y.; Saliba, J.; Loukili, A. Fracture Examination in Concrete through Combined Digital Image Correlation and Acoustic Emission Techniques. *Constr. Build. Mater.* ۲۰۱۴, ۶۹, ۲۳۲-۲۴۲.
۲۴۸. Yang, Z.; Ren, W.; Mostafavi, M.; Mcdonald, S.A.; Marrow, T.J. Characterization of ۳D Fracture Evaluation in Concrete Using In-situ X-Ray Computed Tomography Testing and Digital Volume Correlation. In *VIII International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures*; CIMNE: Toledo, OH, USA, ۲۰۱۳; pp. ۲۳۶-۲۴۲