



NEW APPROACHES in CONSTRUCTION and PROJECT MANAGEMENT

Quarterly Journal of the Civil Engineering Department, Faculty of Engineering

<https://cpm.aletaha.ac.ir>



Investigating the properties of cementitious materials using X-ray tomography

Abolghasem Kharazmi^{a*}, Seyed hamid Kalali^b

^a Master of Civil Engineering, Kharazmi University, Tehran, Iran; Gh.kharazmi@gmail.com

^b Master of Civil Engineering, Hakim Sabzevari University, Tehran, Iran; Seyedhamidkalali@gmail.com

Abstract

X-ray computed tomography is a non-destructive technique that provides a three-dimensional insight into the microstructure of opaque specimens without any preliminary sample preparation. Since its first medical application in 1973, the technique has improved dramatically in terms of time to use and accuracy. The best achievable accuracy for both parallel and cone beam systems is currently submicron. The macroscopic properties (hardness, strength, permeability, durability, etc.) of cementitious materials are significantly influenced by their multi-scale microstructure, which necessitates the X-ray tomography investigation of cementitious materials down to the smallest length scale. The present review first provides background information on the technique (including image processing). It then covers various applications of X-ray computed tomography for cementitious materials, including pore network imaging, durability testing, damage investigation testing, advanced nanotomography testing, as well as discussing current challenges such as time-dependent testing and dissolved materials.

Article history:

Received: 04/05/2025

Revised: 13/07/2025

Accepted: 22/07/2025

Keywords

Computed tomography, microstructure, durability, concrete, hydration.

* corresponding author: Master of Civil Engineering, Kharazmi University, Tehran, Iran; Gh.kharazmi@gmail.com;



وزارت علوم، تحقیقات و فناوری
مؤسسه آموزش عالی آل ط

رویکردهای نوین در مدیریت ساخت و پروژه

فصلنامه گروه مهندسی عمران دانشکده فنی و مهندسی

<https://cpm.aletaha.ac.ir>



بررسی خواص مواد سیمانی با استفاده از توموگرافی اشعه ایکس

ابوالقاسم خوارزمی^{۱*}، سید حمید کلالی^۲

۱. کارشناسی ارشد دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران؛ Gh.kharazmi@gmail.com

۲. کارشناسی ارشد دانشگاه حکیم سبزواری، تهران، ایران؛ Seyedhamidkalali@gmail.com

چکیده فارسی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۱۴

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۴/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۳۱

توموگرافی کامپیوتری اشعه ایکس یک تکنیک غیرمخرب است که بینشی سه‌بعدی از ریزساختار نمونه‌های غیرشفاف را بدون هیچ‌گونه آماده‌سازی اولیه نمونه ارائه می‌دهد. از زمان اولین کاربرد پزشکی در سال ۱۹۷۳، این تکنیک به‌طور چشمگیری از نظر زمان استفاده و دقت بهبود یافته است. بهترین دقت قابل دستیابی برای هر دو سیستم پرتوهای موازی و مخروطی در حال حاضر کوچک‌تر از میکرون است. خواص ماکروسکوپی (سختی، مقاومت، نفوذپذیری، دوام و ...) مواد سیمانی به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر ریزساختار چند مقیاسی آن‌ها قرار دارد که این امر مستلزم بررسی توموگرافی اشعه ایکس مواد سیمانی تا کوچک‌ترین مقیاس طول است. بررسی حاضر ابتدا اطلاعات پس‌زمینه‌ای در مورد این تکنیک (از جمله پردازش تصویر) ارائه می‌دهد. سپس کاربردهای مختلف توموگرافی کامپیوتری اشعه ایکس برای مواد سیمانی را پوشش می‌دهد، که شامل تصویربرداری از شبکه متخلخل، آزمایش‌های دوام، آزمایش‌های بررسی آسیب، آزمایش‌های نانوتوموگرافی پیشرفته و همچنین چالش‌های فعلی مانند آزمایش‌های وابسته به زمان و مواد محلول مورد بحث قرار می‌گیرند.

واژگان کلیدی

توموگرافی کامپیوتری، ریزساختار، دوام، بتن، هیدراتاسیون.

* نویسنده مسئول: کارشناسی ارشد دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران؛ Gh.kharazmi@gmail.com

۱. مقدمه

مواد سیمانی با یک ریزساختار پیچیده و معروف چند مقیاسی شناخته می‌شوند که جزئیات آن نقش مهمی در ویژگی‌های ماکروسکوپی مانند سختی، مقاومت، تغییر شکل طولانی‌مدت و دوام دارد؛ در نتیجه تعداد زیادی از مطالعات به توصیف تنها ریزساختار اختصاص داده شده است. توموگرافی کامپیوتری اشعه ایکس (CT) و میکرو توموگرافی کامپیوتری (Micro CT) برای چندین سال در حوزه تجزیه و تحلیل مواد غیرپزشکی مورد استفاده قرار گرفته‌اند، اما در ۱۰ سال گذشته شاهد تحول این تکنیک از یک ابزار تصویربرداری کیفی به یک روش تجزیه و تحلیل کمی به‌ویژه در علم مواد هستیم. هدف این مطالعه بررسی و ترسیم زمینه استفاده از میکروسیتی برای مصالح سیمانی است تا سایر محققینی که با بتن یا ترکیبات سیمانی کار می‌کنند بتوانند از این روش برای توسعه مصالح ساختمانی پیشرفته استفاده کنند. به‌طور ویژه این مطالعه بر کاربردهای این روش در بررسی خواص مواد سیمانی متمرکز است. بدین‌صورت که در بخش ۲ به خلاصه تئوری و اصول اولیه این روش و همچنین انواع امکانات و دقت اسکن‌ها پرداخته می‌شود. در بخش ۳ کاربردهای این روش در بررسی خصوصیات مواد سیمانی در حالت‌های ایستا و پویا در حوزه‌های مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد و به بررسی نتایج ارائه شده توسط محققین قبلی پرداخته می‌شود.

۲. میکروسیتی اشعه ایکس

۲-۱. اصول اولیه

اشعه ایکس شکلی از امواج الکترومغناطیسی مانند رادیو، مادون قرمز، مرئی یا فرابنفش است که طول موج کوتاه‌تری نسبت به امواج فرابنفش دارد و انرژی هر فوتون پرتو ایکس با طول موج آن نسبت عکس دارد؛ بنابراین پرتو ایکس در مقایسه با سایر امواج الکترومغناطیسی به‌جز پرتوهای کیهانی انرژی بیشتری دارد. اشعه ایکس با سطوح انرژی پایین نمی‌تواند به مواد ضخیم‌تر نفوذ کند؛ درحالی‌که اشعه ایکس با سطوح انرژی بالا نمی‌تواند اطلاعات با کنتراست پایین ارائه دهد. محدوده انرژی پرتوهای ایکس کاربردی برای تصویربرداری بین ۱۲.۴ تا ۱۲۴ کیلو الکترون ولت است که در آن طول موج از ۰.۱ تا ۰.۰۱ نانومتر متغیر است [۱].

منابع اشعه ایکس برای سی‌تی به دو صورت آزمایشگاهی یا سینکروترون هستند. اشعه ایکس آزمایشگاهی از یک لامپ اشعه ایکس که الکترون‌های پرسرعت را به سمت مواد آند هدف مانند تنگستن، مولیبدوم یا مس بمباران می‌کند، تولید می‌شود. اشعه ایکس سینکروترون زمانی تولید می‌شود که پرتوهای الکترونی بسیار شتاب‌دار از حلقه‌های ذخیره‌سازی یا یک شتاب‌دهنده ذرات از طریق مگنت خم‌کننده و وسیله‌های الحاقی منتقل شوند. اسکنرهای آزمایشگاهی دارای میدان دید بزرگ، سهولت در استفاده و مقرون به‌صرفه هستند. از سوی دیگر تابش سینکروترون، پهنای باند انرژی کمی را انتخاب می‌کند. قابل تنظیم و تکرنگ است و پرتوهای اشعه ایکس موازی با شار فوتون بالا را برای اسکن سریع نشان می‌دهد، که منجر به ضبط تصاویر با وضوح بالا، نسبت سیگنال به نویز بالا و کاهش آرتیفکت‌های سخت‌شدگی پرتو در تصاویر بازسازی شده می‌شود [۱، ۲].

سی‌تی‌اسکن از طریق فعل و انفعالات بین اشعه ایکس و مواد (انرژی فوتون اشعه ایکس و عدد اتمی مواد) به‌دست می‌آید. رایج‌ترین حالت اسکن، اسکن مبتنی بر تضعیف است، که در آن شدت اشعه ایکس I طبق قانون بیر-لامبرت (Beer-Lambert Law) کاهش می‌یابد؛ به‌عنوان مثال در فرمول I شدت اشعه ایکس ورودی و x ضخامت ماده در جهت انتقال اشعه ایکس است. در فرمول ۱ ضریب μ به‌عنوان ضریب تضعیف خطی (Linear Attenuation Coefficient (LAC)) نامیده می‌شود که به‌طور معمول دارای واحد (cm^{-1}) است و به انرژی اشعه ایکس و عدد اتمی ماده وابسته است. شدت پرتو ایکس ارسالی توسط آشکارسازهایی مانند دستگاه جفت‌کننده بار (Charge Coupled Device (CCD)) یا فناوری‌های نیم‌رسانای اکسید فلز مکمل Complementary Metal-Oxide Semiconductor (CMOS)) اندازه‌گیری می‌شود.

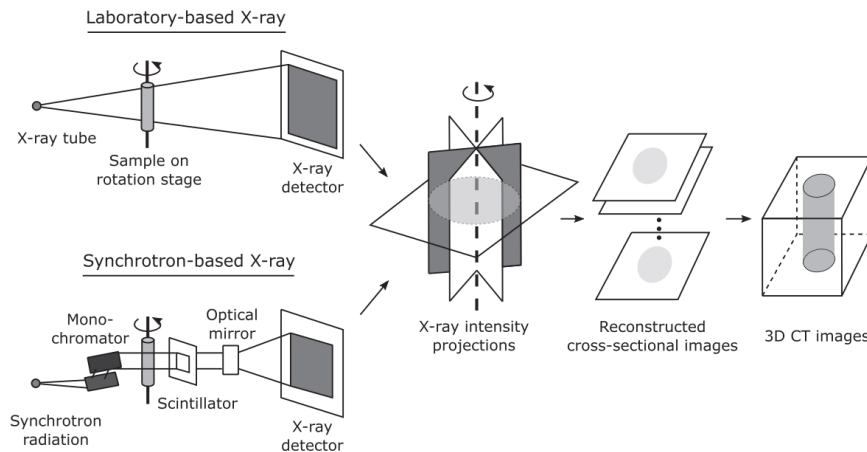
تصاویر شدت اشعه ایکس در اطراف نمونه با چرخش افزایشی نمونه تا ۳۶۰ اندازه‌گیری می‌شود. ریزساختارهای فضایی از تصویرهای شدت اشعه ایکس با استفاده از الگوریتم‌هایی مانند پستابش فیلترشده (Filtered Back Projection) بازسازی می‌شوند. مقادیر ضریب تضعیف خطی بر روی تصاویر بازسازی شده (توموگرام) نگاشت می‌شوند، اما به‌طور کلی به اعداد صحیح ۸ یا ۱۶ بیتی مقادیر خاکستری از طریق تبدیل خطی برای مصورسازی و اهداف ذخیره‌سازی تبدیل می‌شوند. تصاویر مقطعی بازسازی شده در جهت عمود بر هم چیده می‌شوند تا ریزساختارهای سه‌بعدی به‌دست آید. روش سی‌تی‌اسکن اشعه ایکس در شکل ۱ نشان داده شده است.

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

فرمول ۱:

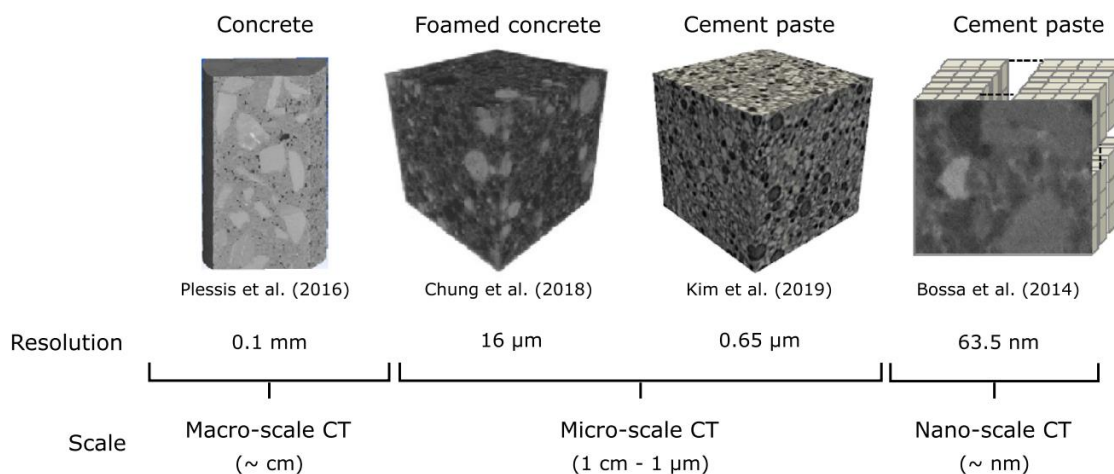
۲-۲. انواع امکانات و دقت میکروسیتی

میکروسیتی معمولاً به اسکنرهای سی تی با وضوح و کسل زیرمیلیمتری اشاره می کند، اما نام عمومی مناسب تر، سیتی میکروسکوپی است [۳]. اگرچه مقیاس های چندگانه میکروسیتی را می توان طبقه بندی کرد؛ به عنوان مثال ماکروسیتی، میکروسیتی و نانوسیتی، بسته به دقت فضایی، اصطلاح میکروسیتی می تواند به عنوان یک اصطلاح نماینده سی تی میکروسکوپی برای این اسکنرها استفاده شود.



شکل ۱: شماتیک روش سی تی اسکن اشعه ایکس

مقیاس های میکروسیتی به صورت شماتیک در شکل ۲ نشان داده شده است. مقیاس ماکرو برای اسکن های اندازه بتن در حد ۱۰ سانتی متر استفاده می شود و اجزای تشکیل دهنده بتن مانند چسبها، سنگدانه ها و منافذ را می توان تا حد رزولوشن مشخص کرد. اجسام سی تی اسکن در مقیاس میکرو تقریباً از ۱ سانتی متر تا ۱۰ میکرومتر متغیر هستند، اما می توانند مشخصه های بزرگ تر یا کوچک تر را نیز اسکن کنند. اجزای تشکیل دهنده ملات و ریزساختارهای منفذی/ فاز جامد خمیر سیمان را می توان در مقیاس میکرو شناسایی کرد. هنگامی که ریزساختارهای منافذ بررسی می شوند، حتی مقیاس میکرو با دقت بالا نیز نمی تواند طیف وسیعی از منافذ مویرگی را که از ۱۰ نانومتر تا ۱۰ میکرومتر متغیر است، ثبت کند. برای توصیف بیشتر ریزساختار منافذ در اندازه زیرمیکرون، می توان از مقیاس نانو استفاده کرد و مشاهده شده است که تا حدودی برای جبران داده های مقیاس میکرو مفید واقع می شود [۴]. توجه داشته باشید که حتی پیشرفته ترین نانوسیتی نمی تواند طیف وسیعی از منافذ ژل را علاوه بر مرزهای پایینی منافذ مویرگی پوشش دهد [۵، ۶].



شکل ۲: مقیاس های اسکنر میکروسیتی: مقیاس کلان (پلسیس و همکاران [۷])، مقیاس میکرو (چانگ و همکاران [۸]، کیم و همکاران [۹]) و مقیاس نانو (بوسا و همکاران [۴]).

کیفیت، دقت و زمان اکتساب سی تی اسکن به تنظیمات میکروسیتی، منابع اشعه ایکس (آزمایشگاهی یا سنکروترون)، سیستم آشکارساز و الگوریتم‌های بازسازی از جمله پیش یا پس پردازش داده‌های به دست آمده بستگی دارد. بیش از ده‌ها فروشنده تجاری وجود دارند که تجهیزات میکروسیتی آزمایشگاهی و سنکروترون را تولید می‌کنند.

تنظیم یا نوع میکروسیتی را می‌توان متناسب با هدف سی تی اسکن انتخاب کرد. با توجه به محدودیت دقت، حتی با پیشرفته‌ترین میکروسیتی، یک بررسی دقیق لازم است تا خواص مواد با تخلخل یا ریزساختارهای منافذ به دست آمده از میکروسیتی و روش‌های جایگزین مانند MIP، SEM و TEM مقایسه شود. با وجود این که میکروسیتی دارای محدودیت دقت است، همچنان می‌توان به تصاویر با دقت نسبتاً بالا دست یافت و ویژگی‌های فضایی درون جسم به صورت سه بعدی را بدون آسیب رساندن به نمونه تحلیل کرد. اطلاعات به دست آمده با استفاده از میکروسیتی می‌تواند برای تحقیقات بیشتر، به عنوان مثال، تقسیم بندی اجزاء و شبیه سازی عددی مورد استفاده قرار گیرد. با این حال دستیابی به ریزساختارهای سه بعدی در کنار سایر اطلاعاتی که با ابزارهای جایگزین مشخص می‌شود، قطعاً موجب تسریع در تحقیقات مرتبط با بتن است.

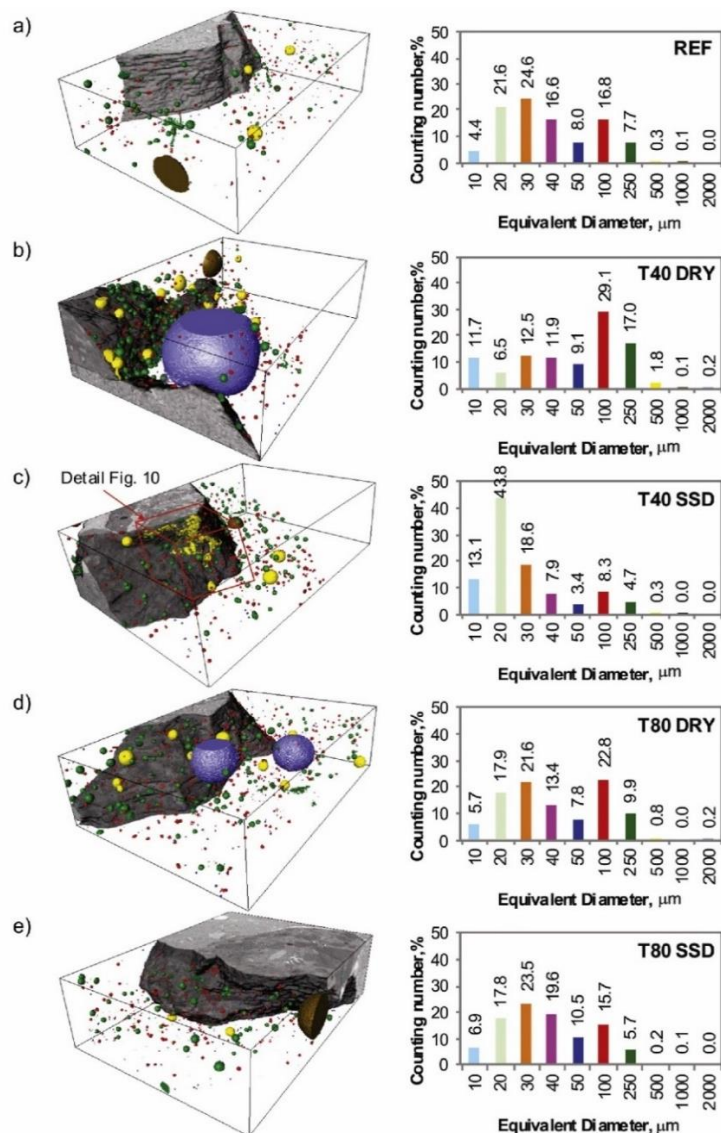
۳. مشاهدات و آزمون‌ها

۳-۱. مشاهدات ایستایی

در بخش حاضر، کاربردهای ایستای میکروسیتی در مواد سیمانی را مورد بحث قرار می‌دهیم. منظور ما از «ایستا» برنامه‌هایی است که در آن تنها یک تصویر لحظه‌ای از نمونه در نظر گرفته می‌شود و تحولات احتمالی ریزساختاری نادیده گرفته می‌شود. ما ابتدا در مورد مشاهدات ویژگی‌های دارای کنتراست (منافذ و اجزای مختلف غیرسیمانی) که در (اما نه بخشی از) ماتریس سیمانی جاسازی شده‌اند، بحث می‌کنیم. این بخش به کمیت چالش برانگیزتر خود ماتریس سیمانی محصور می‌شود.

خواص ماکروسکوپی مواد سیمانی توسط ساختار شبکه متخلخل آن‌ها کنترل می‌شود و بسیاری از مطالعات بر روی تجزیه و تحلیل شبکه متخلخل در رابطه با مثلاً خواص ماکروسکوپی مکانیکی یا دوام متمرکز شده‌اند. توزیع اندازه منافذ معمولاً از چند ده نانومتر تا چند میلی‌متر متغیر است، که این بررسی را چالش برانگیزتر می‌کند. به دلیل وضوح و کنتراست عالی بین هوا و خمیر سیمان، میکروسیتی اشعه ایکس برای توصیف ساختار سه بعدی شبکه متخلخل و استخراج پارامترهای ریزساختاری مختلف مانند تخلخل کل، توزیع اندازه منافذ، اتصال و انحنای شبکه منافذ مناسب است.

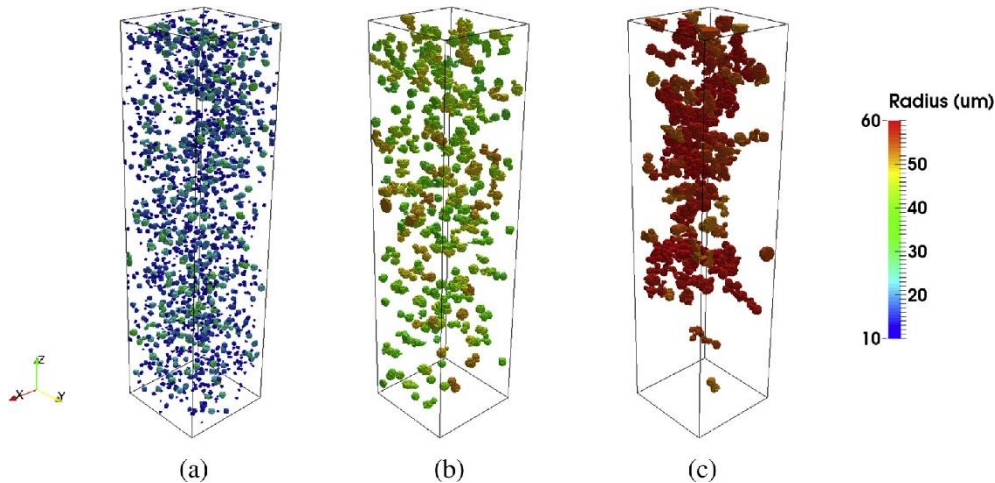
کنتراست بین هوا و محصولات هیدراتاسیون منجر به تصاویری می‌شود که به راحتی می‌توان آن‌ها را بخش بندی کرد و امکان تخمین قابل اعتماد پارامترهای ریزساختاری مانند توزیع اندازه منافذ را فراهم می‌کند. به عنوان مثال لیت و مونتیرو [۱۰] از میکروسیتی برای ارزیابی تأثیر پیش آماده سازی سنگدانه‌های باز یافتی بر توزیع اندازه منافذ در بتن جدید استفاده کردند (شکل ۳ را ببینید). میکروسیتی اشعه ایکس برای مشخص کردن موارد زیر استفاده شده است: نمونه‌های بتن ساخته شده با نسبت‌های آب به سیمان مختلف [۱۱]، بتن های حاوی مواد افزودنی شیمیایی [۱۲، ۱۳] یا مواد معدنی [۱۴] افزوده شده، مواد سیمانی مبتنی بر چسب‌های جدید [۱۵، ۱۶]. اخیراً توسط فراری و همکاران [۱۷] تخلخل دانه‌های سیمان نیز با استفاده از میکروسیتی اشعه ایکس مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. میکروسیتی اشعه ایکس همچنین در زمینه مواد سیمانی حاوی تخلخل مهندسی شده اضافی، مانند مواد عایق [۱۸]، خمیر سیمان هوادار [۱۹]، بتن متخلخل [۲۰]، ملات سبک حاوی ضایعات پلیمری [۲۱]، فوم بتن [۲۲]، فوم‌های فعال قلیایی [۲۳] (به عنوان نمونه به شکل ۴ مراجعه کنید) توجه زیادی را به خود جلب کرده است. سپس تصاویر سه بعدی به دست آمده برای تخمین خواص ماکروسکوپی مانند نفوذپذیری هوا [۲۲، ۲۴] و هدایت حرارتی [۲۶] چنین مواد سیمانی متخلخل استفاده شده است. سپس از تصاویر سه بعدی به دست آمده برای تخمین خواص ماکروسکوپی مانند نفوذپذیری هوا [۲۴، ۲۵] و هدایت حرارتی [۲۶] چنین مواد سیمانی متخلخل استفاده شده است. میکروسیتی اغلب با تکنیک‌های دیگر به منظور بررسی کوچک‌ترین منافذ تکمیل می‌شود که در غیر این صورت شناسایی نشده باقی می‌مانند. نمونه‌ای از ادغام روش تخلخل سنجی نفوذ جیوه و میکروسیتی را می‌توان در تحقیق داس و همکاران [۲۷] مشاهده کرد. جایی که تخلخل سنجی نفوذ جیوه برای تعیین توزیع اندازه منافذ در محدوده ۰.۰۰۳۶ تا ۱۰ میکرومتر برای تکمیل مطالعات سی تی که اندازه‌های بین ۰.۷۴ میکرومتر تا ۵۰ میکرومتر را بررسی می‌کردند استفاده شد (شکل ۵ را ببینید).



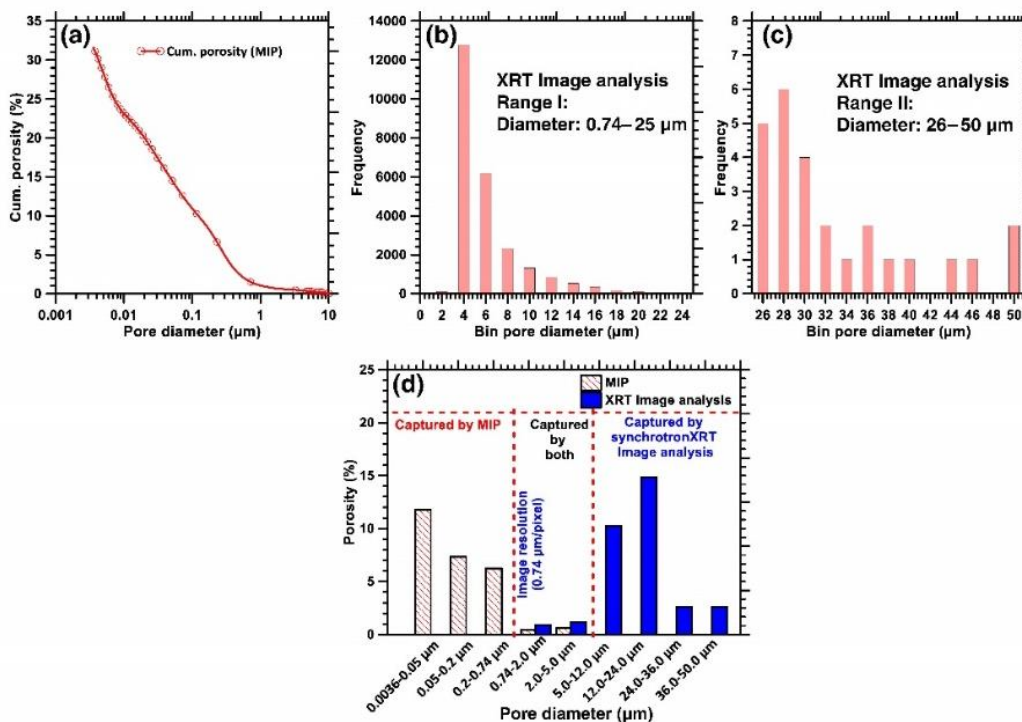
شکل ۳: تصاویر میکروسیتی از منشورهای بتنی (۲۱۰۰ × ۷۵۰۰ × ۵۵۰۰ میکرومتر) که اندازه و توزیع فضایی منافذ و همچنین توزیع اندازه منافذ مربوطه را نشان می‌دهد [۱۰]. نمونه‌ها بتن جدیدی هستند که با سنگدانه‌های بازیافت شده از بتن اصلی با مقاومت بالا با پیش‌آماده‌سازی‌های مختلف ساخته شده‌اند (سنگدانه خشک، سنگدانه خشک با سطح اشباع شده).

کاربرد سی‌تی برای مطالعات تخلخل دارای چالش‌هایی مانند وابستگی پارامترهای ساختار منافذ به دقت اسکن است [۶]. گالوچی و همکاران [۶] گزارش داد که تخلخل و اتصال منافذ اندازه‌گیری شده توسط میکروستری به شدت به اندازه و کسل (رزولوشن فضایی) بستگی دارد. در واقع آن‌ها نشان دادند که کاهش اندازه و کسل (از ۲.۶۷ به ۲، ۱.۳۴ و ۰.۶۷ میکرومتر) باعث افزایش اتصال شبکه منفذ محاسبه شده (به ترتیب از ۰ به ۶۶ و ۸۲ به ۹۵ درصد) و تخلخل محاسبه شده به (به ترتیب از ۵.۰۳ به ۶.۶۳ و از ۱۱.۴۸ به ۱۸.۶ درصد) می‌شود. نتایج متضادی توسط پلیسیس و همکاران به دست آمد [۷] که گزارش داد که هیستوگرام‌های توزیع اندازه منافذ در ناحیه همپوشانی بدون توجه به وضوح و مدت زمان اسکن مشابه هستند. نتیجه‌گیری آن‌ها براساس یک برنامه تجربی بود که در آن وضوح فضایی از ۵ تا ۱۰۰ میکرومتر و مدت زمان اسکن از ۵ دقیقه تا ۱ ساعت متغیر بود. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که CT می‌تواند یک ابزار کارآمد، ساده و مقرون به صرفه برای تجزیه و تحلیل توزیع اندازه منافذ و محاسبه تخلخل و تجسم باشد، به‌ویژه زمانی که منافذ بزرگ مورد نظر و دسته‌های بزرگ نمونه نیاز به مقایسه دارند.

علاوه بر منافذ، میکروسیتی اشعه ایکس برای بررسی پراکندگی در ماتریس سیمانی ویژگی‌ها و افزودنی‌های مختلفی که در بتن مدرن برای افزایش خواص آن و ایجاد مواد با کارایی بالا به کار می‌روند استفاده شده است: چوب [۲۸]، فولاد [۲۹]، پلیمر [۳۰]، پلی اتیلن ترفتالات (PET) [۳۱] و الیاف کربن [۳۲]، سنگدانه‌های بازیافتی [۱۰]، مواد تغییردهنده فاز [۳۳، ۳۴]، سنوسفرها [۳۵]، ذرات کنف [۳۶]، کلوخه اکسید گرافن [۳۷، ۳۸]، رزین اپوکسی پایه آب [۳۹]، متراکم (دانه‌های سیمان هیدراته نشده) و قطعات متخلخل ماتریس سیمان [۴۰]. مجدداً شایان ذکر است، کنتراست نسبتاً خوب در چگالی و تضعیف خطی اشعه ایکس بین ویژگی‌های مورد نظر و ماتریس سیمانی اطراف آن چیزی است که تصویربرداری اشعه ایکس آن‌ها را ممکن می‌کند.

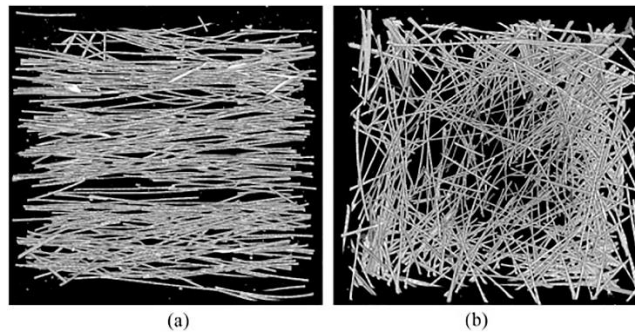


شکل ۴: توزیع فضای خالی نمونه‌های خمیر سیمان عایق با مواد جامد هوا بسته به اندازه حفرات [۴۱]: الف) حفرات با شعاع ۱۰-۳۰ میکرومتر، ب) حفرات با شعاع ۳۰-۵۰ میکرومتر، ج) حفرات با شعاع بزرگ‌تر از ۵۰ میکرومتر

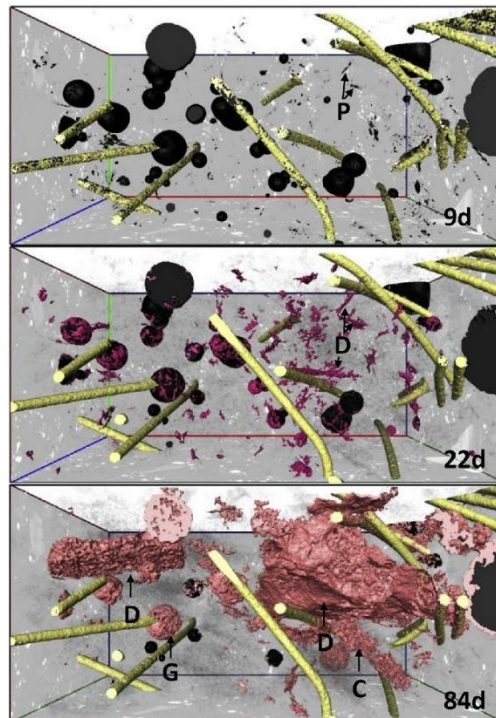


شکل ۵: توزیع منافذ به دست آمده با استفاده از تخلخل‌سنجی نفوذ جیوه و میکروسیتی روی خمیر ژئوپلیمر خاکستر بادی [۲۷]. شکل نشان می‌دهد که هر دو تکنیک از نظر اندازه منافذ مکمل یکدیگر هستند.

بتن مسلح شده با الیاف فولادی به دلیل کنتراست عالی بین فولاد، زمینه سیمانی و هوا، یک مثال متعارف از چنین کاربردهایی است؛ همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده است. پارامترهای ریزساختاری مانند نسبت حجمی الیاف، فاصله بین الیاف و توزیع جهت‌گیری الیاف [۴۲] را می‌توان از تصاویر سه‌بعدی استخراج کرد و با عملکرد مواد مرتبط دانست. هرمان و همکاران [۴۳] روشی را براساس تحلیل ماتریس هسین تصویر برای بازیابی الیاف و جهت‌گیری آن‌ها پیشنهاد می‌کنند. این موضوع توسط اوش و همکاران [۴۲] نشان داده شده است که نشان می‌دهد چگونه روش بتن‌ریزی بر توزیع زاویه‌ای الیاف تأثیر می‌گذارد. کاربردهای پیشرفته‌تر شامل تصویرسازی سطح شکست و محاسبه انرژی تلف شده توسط ترک در نمونه‌های تقویت شده با الیاف است [۲۹]. تشخیص الیاف مصنوعی و چوب دشوارتر است؛ زیرا میرایی کم اشعه ایکس آن‌ها شبیه به فضاهای خالی است. چنین الیافی اغلب با استفاده از فیلترهای مبتنی بر شکل و اندازه تفکیک می‌شوند [۴۴]. هرماندز-کروز و همکاران [۳۰، ۴۵] جهت‌گیری مطلوب الیاف مصنوعی، تشکیل ژل ASR، مکان‌های شروع ترک، مسیرهای انتشار ترک و حل شدگی سنگدانه‌ها به دلیل واکنش قلیایی سیلیسی را نشان دادند (رجوع شود به شکل ۷).



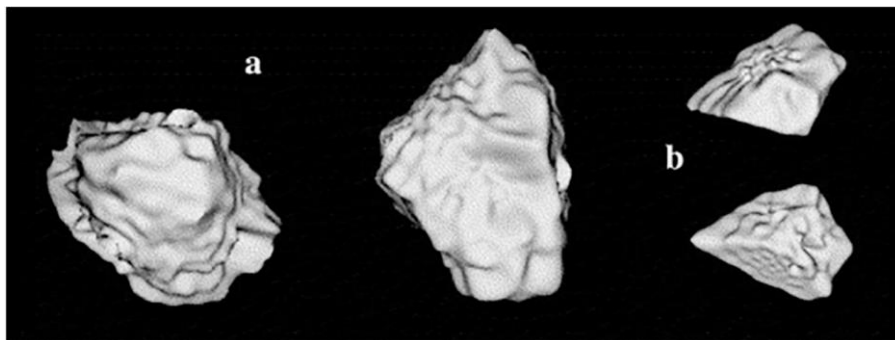
شکل ۶: مشاهده توزیع الیاف فولادی در بتن الیافی [۴۶]: الف) الیاف فولادی با استفاده از میدان الکترومغناطیسی تراز شده است. ب) الیاف فولادی غیرتراز.



شکل ۷: تصاویر سه‌بعدی که پیشرفت اثر واکنش قلیایی-سیلیسی را در ملات مرکب حاوی الیاف PP پس از ۹، ۲۲ و ۸۴ روز در محلول NaOH نشان می‌دهد. اندازه زیرحجم $۱.۶ \times ۱.۲ \times ۲.۵$ میلی‌متر [۴۵]. شکاف‌ها و فضای خالی اولیه هوا (سیاه)، الیاف پلی‌پروپیلن (زرد) و ژل واکنش قلیایی-سیلیسی (صورتی).

یکی دیگر از کاربردهای مشاهدات ایستا، تصویربرداری از اجزای منفرد مواد سیمانی، مانند ذرات سیمان یا سنگدانه، به منظور دستیابی به توصیف واقعی تر شکل آن‌ها در شبیه‌سازی‌های عددی است. شبیه‌سازی‌های عددی مرسوم واکنش هیدراتاسیون، به دلیل ساده‌سازی ذاتی در فرمول‌بندی‌های الگوریتم و کاهش زمان محاسباتی مربوطه، اغلب یک ذره سیمان را کروی فرض می‌کنند. این موضوع باعث ایجاد انگیزه قوی برای استفاده از تصاویر توموگرافی برای ایجاد اشکال واقعی ذرات سیمان [۴۷، ۴۸] و سنگدانه [۴۹، ۵۰]، اما مقرون به صرفه می‌شود (شکل ۸ را ببینید).

تجزیه و تحلیل توموگرافی نشان داد که مساحت سطح در مقابل حجم ذرات سیمان با دانه‌های کروی متفاوت است، به طوری که ذرات سیمان تمایل به کشیدگی دارند؛ یعنی با یک بعد بزرگ‌تر از دو بعدی دیگر [۵۱، ۵۲]. از آنجایی که شکل ذرات سیمان نقش مهمی در فرایند هیدراتاسیون ایفا می‌کند، تفاوت بین شکل ذرات سیمان فرضی و واقعی می‌تواند به تفاوت‌های قابل توجهی بین مطالعات هیدراتاسیون شبیه‌سازی شده و تجربی منجر شود. در کار هولزر و همکاران [۵۳] در مورد شکل ذرات سیمان و تأثیر آن‌ها بر مدل‌سازی، میکروسیتی اشعه ایکس برای بررسی شکل سه‌بعدی ذرات در محدوده غربال ۲۰-۶۰ میکرومتر استفاده شد. نانو توموگرافی پرتو یون متمرکز برای بررسی شکل سه‌بعدی ذرات سیمان موجود در بازه ۰.۴ تا ۲.۰ میکرومتر استفاده شد که منجر به تجزیه و تحلیل ذرات آماری در محدوده اندازه‌گیری شد.



شکل ۸: دو نما از دو ذره سیمان [۵۴]: الف) قطر کروی معادل ذره حدود ۳۶ میکرومتر ب) قطر کروی معادل ذره حدود ۱۵ میکرومتر.

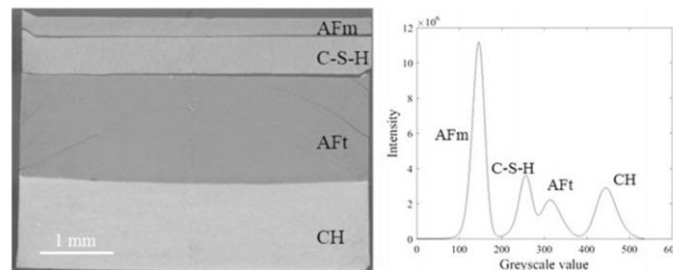
بررسی ماتریس سیمانی با هدف کنترل خواص ماکروسکوپی مواد سیمانی با تنظیم دقیق ریزساختار از روند ایجاد شده در صنعت سیمان و بتن تأثیر پذیرفته است. با توجه به ماهیت پیچیده، چند فازی و چند مقیاسی این مواد، این کار دستاوردی با ارزش است. فازهای مختلف در یک ماتریس سیمانی معمولاً براساس سطح خاکستری آن‌ها شناسایی می‌شوند. با این حال کنتراست بین محصولات مختلف هیدراتاسیون معمولاً بسیار کم است.

دیبودت و همکاران [۵۵] یک متدولوژی کامل برای غلبه بر محدودیت‌های ناشی از کنتراست کم بین چهار فاز هیدراته اولیه در سیمان پرتلند، یعنی C-S-H، هیدروکسید کلسیم، مونو سولفات و اترنژیت تدوین کردند. برای انجام این کار، آن‌ها از فازهای خالص و همچنین مخلوط دوتایی و چهارتایی فازها، تصویربرداری کردند (شکل ۹ را ببینید). آن‌ها براساس هیستوگرام سطح خاکستری فازهای خالص، ترکیب مخلوط‌های دوتایی و چهارتایی را کمی کردند و بنابراین راه را برای توصیف کمی فاز هموار کردند. در حال حاضر، چنین رویکردهایی به آزمایش‌های تک‌رنگ (سنکروترون) محدود می‌شود، جایی که می‌توان از سخت‌شدگی پرتو چشم‌پوشی کرد.

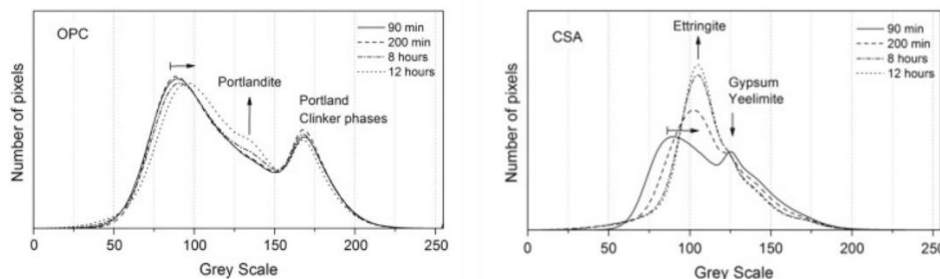
۲-۳. مشاهدات دینامیکی

بخش حاضر به کاربردهای دینامیکی میکروسیتی اشعه ایکس در مواد سیمانی اختصاص دارد. منظور از «دینامیک» برنامه‌هایی است که تغییرات ریزساختاری در طول زمان بررسی می‌شوند. مشاهدات دینامیکی به صورت لحظه‌ای، هنوز نسبتاً چالش‌برانگیز هستند؛ زیرا به امکانات توموگرافی سریع (یا فوق سریع) نیاز دارند. با این حال برای تکامل به اندازه کافی آهسته، مشاهدات دینامیکی ممکن است با به‌دست آوردن اسکن‌های معمولی در فواصل چند روزه (ماه یا سال) به‌دست آید.

نظارت بر هیدراتاسیون احتمالاً واضح‌ترین (اما شاید نه آسان‌ترین کاربرد) میکروسیتی اشعه ایکس دینامیکی برای مواد سیمانی است. میکروسی تی اشعه ایکس بینش عمیق‌تری در مورد هیدراتاسیون مواد سیمانی ارائه کرده است؛ به‌عنوان مثال برای اندازه‌گیری مقدار ذرات سیمان هیدراته نشده در حال واکنش، برای نظارت بر تغییرات در تخلخل ماتریس هیدراته [۵۶] و برای آشکار کردن رابطه مکانی و زمانی بین اجزای مختلف خمیر سیمان بسته به ترکیب مخلوط سیمانی استفاده شده است [۵۷]. میکروسیتی اشعه ایکس می‌تواند با تکنیک‌های دیگر همراه شود یا برای حمایت از یافته‌های آن‌ها استفاده شود؛ به‌عنوان مثال آزمایش سرعت پالس اولتراسونیک (UPV)، مقاومت الکتریکی غیرتماسی (NER) و انتشار آکوستیک (AE). در اغلب موارد انرژی‌های حدود ۱۰-۱۵ کیلوالکترون ولت برای اطمینان از حصول از دقت مورد نیاز (زیر ۱ میکرومتر) استفاده می‌شود. چوتارد و همکاران [۵۸] پیشنهاد کردند که هیدراتاسیون یک فرایند ناهمگن است که ممکن است از هسته نمونه شروع شود و به سمت مرزهای آن گسترش یابد. هلفن و همکاران [۵۹] قادر به مشاهده تشکیل هسته اولیه ترک‌های ناشی از انقباض و کمی‌سازی توسعه تخلخل با گذشت زمان شدند. اخیراً گاستالدی و همکاران [۶۰] هیستوگرام‌های سطح خاکستری در حال تکامل زمانی را اندازه‌گیری کردند که برای به‌دست آوردن اطلاعاتی در مورد تکامل محصولات هیدراتاسیون سیمان OPC و CSA استفاده شد (شکل ۱۰ را ببینید).



شکل ۹: (سمت چپ) تصویر خاکستری از چهار محصول اولیه هیدراتاسیون در سیمان پرتلند که در آزمایشگاه تولید شده و روی هم قرار گرفته‌اند [۵۵]: ژل C-S-H، کلسیم هیدروکسید (CH)، مونو سولفات (AFm) و اترنژیت (AFt). کنتراست بین هر چهار فاز نسبتاً کم است (راست). هیستوگرام سطوح خاکستری برای هر فاز خالص.



شکل ۱۰: تکامل هیستوگرام‌های سطح خاکستری در طول هیدراتاسیون سیمان OPC و CSA. محصولات هیدراتاسیون با مقدار مقیاس خاکستری آن‌ها شناسایی می‌شوند [۶۰].

۴. نتیجه‌گیری

بررسی حاضر نشان می‌دهد که در ۱۵ تا ۲۰ سال گذشته، توموگرافی کامپیوتری اشعه ایکس به ابزاری واقعی برای تصویربرداری غیرمخرب از مواد سیمانی تبدیل شده است. این تکنیک به‌طور معمول برای موارد زیر استفاده می‌شود: الف) تجزیه و تحلیل ریزساختار، هندسه سه‌بعدی، شبکه متخلخل، توزیع فضایی فازها، توزیع زاویه‌ای الیاف فولادی و ب) نظارت بر تکامل آسیب‌های مکانیکی و شیمیایی، ترک‌خوردگی و تخریب از طریق شستگی، واکنش قلیایی-سیلیسی، کربناته شدن. بایستی تأکید کرد که در بیشتر موارد، تصاویر سه‌بعدی حاصل می‌توانند (همیشه باید) به‌صورت کمی تحلیل شوند. به‌عبارت دیگر آزمایش توموگرافی به‌جای یک تصویر صرف (هر چند جذاب) به‌عنوان یک روش اندازه‌گیری در نظر گرفته می‌شود. به منظور بررسی بیشتر کاربردهای این روش، علاقه‌مندان می‌توانند به منابع [۶۱-۶۴] رجوع کنند.

۴-۱. کاربردهای عملیاتی

با توجه به آن که این روش امکان استخراج پارامترهایی مانند تخلخل کل، توزیع اندازه منافذ، اتصال شبکه حفرات و شکل سنگدانه‌ها را با دقت بالا و نیز امکان تحلیل سه‌بعدی شبکه‌های متخلخل را دارد، توانایی به‌کارگیری در تعیین دقیق کیفیت مصالح پروژه‌ها را دارد؛ به‌عنوان مثال در انتخاب بتن مناسب برای یک محیط ساحلی، با استفاده از داده‌های میکروسیتی می‌توان فهمید که کدام طرح اختلاط مقاومت بهتری در برابر نفوذ یون کلرید دارد؛ در نتیجه این کاربرد عملی، تصمیمات مهندسان صرفاً براساس نتایج میانگین آزمایش‌های مخرب سنتی نخواهد بود.

برای استفاده بهینه از فناوری میکروسیتی، بایستی این تکنیک در تمامی مراحل چرخه حیات پروژه گنجانده شود. در زمان طراحی و انتخاب مصالح مورد نیاز، با استفاده از این روش می‌توان بهترین طراح اختلاط را بر مبنای واقعیت تدوین کرد. همچنین در مراحل ساخت، می‌توان کیفیت بتن تولیدی را به‌صورت دوره‌ای بررسی کرد تا ضمن پایش کیفیت مصالح و طرح اختلاط، در صورت وجود تغییرات حائز اهمیت، طرح‌های جایگزین را مطابق با شرایط مذکور ارائه کرد. پیش از بهره‌برداری از سازه نهایی نیز با اسکن بخش‌های کلیدی مانند ستون‌ها می‌توان آسیب‌های زیرساختاری را پیش از آن که منجر به مشکلات سطحی شود، شناسایی کرد و به تعمیرات پیشگیرانه پرداخت. در انتها، نتایج حاصل از این روش قابلیت استفاده به‌عنوان یک پایگاه داده برای پروژه‌های آتی را خواهد داشت.

۴-۲. کاربردهای مدیریتی

میکروسیتی با توانایی ارائه تصاویر سه‌بعدی با دقت بالا و ویژگی غیرمخرب خود، قابلیت کاهش قابل توجه زمان آزمایش‌های کنترل کیفیت در پروژه‌های عمرانی را دارد. در روش‌های سنتی، انجام آزمایش‌های مخرب و آماده‌سازی نمونه‌ها ممکن است چندین روز یا هفته به طول بینجامد، اما با این روش بدون نیاز به برش نمونه‌ها و یا آماده‌سازی خاص، می‌توان نتایج دقیق و سریعی از همان نمونه‌های اولیه دریافت کرد که این امر در پروژه‌های بزرگ، که پارامتر زمان اهمیت بالایی دارد، ارزش خود را بیشتر نشان می‌دهد. در روش‌های سنتی زمان نسبتاً زیادی برای تعیین مشخصاتی مانند تخلخل، توزیع اندازه حفرات، یکنواختی مصالح و آسیب‌های ریزساختاری، صرف می‌شود، اما در این روش حجم بالایی از اطلاعات در یک فرایند اسکن به‌دست می‌آید و علاوه بر کاهش چشمگیر زمان کنترل کیفی مصالح، بلکه احتمال نیاز به نمونه‌برداری مجدد را نیز به حداقل می‌رساند و در نتیجه کارایی و دقت فرایندهای ارزیابی را افزایش می‌دهد. میکروسیتی با شناسایی دقیق نقایص داخلی و ناپیوستگی‌های ریزساختاری می‌تواند در پیش‌بینی دوام مصالح سیمانی مؤثر باشد. یکی از چالش‌های اصلی در نگهداری سازه‌ها، عدم تشخیص به‌موقع آسیب‌های میکروسکوپی است که می‌تواند منجر به خرابی‌های پرهزینه شود. با این روش، می‌توان ساختار سه‌بعدی شبکه منافذ، توزیع و پیوستگی ترک‌ها و تغییرات ناشی از واکنش‌های شیمیایی در مراحل ابتدایی را شناسایی کرد و اطلاعات مذکور به مدل‌سازی دقیق‌تر دوام مصالح و پیش‌بینی طول عمر مؤثر آن‌ها کمک کند. با پایش دوره‌ای قطعات ساخت با استفاده از این روش، می‌توان نواحی آسیب‌دیده را قبل از آن که گسترش یابند، ترمیم و یا تعویض کرد. داده‌های کمی حاصل نیز امکان استفاده به‌عنوان دیتای اولیه برای مدل‌های پیش‌بینی رفتار مصالح تحت شرایط محیطی متفاوت را خواهد داشت و انتخاب مصالح و روش‌های مراقبت را بهینه‌تر و واقع‌بینانه‌تر می‌کند؛ لذا امکان افزایش طول عمر بهره‌برداری سازه را فراهم می‌کند.

از جمله کاربردهای این فناوری در بهینه‌سازی پروژه‌ها می‌توان به مقاله ساکولیچ و بنتز [۳۳] اشاره کرد که با هدف افزایش عمر بهره‌برداری عرشه پل‌ها از فناوری میکروسیتی برای بررسی ریزساختار بتن حاوی مواد تغییر فزادنده استفاده شد. داده‌ها نشان دادند که مواد تغییر فزادنده با پرکردن بخشی از منافذ موئینه، باعث کاهش نفوذپذیری و ایجاد یک بافر حرارتی در برابر چرخه‌های انجماد و ذوب می‌شوند. این اقدام منجر شد که تعداد چرخه‌های بحرانی انجماد برای نمونه‌ها تا ۲ برابر افزایش یابد، که در مدل پیش‌بینی دوام، معادل افزایش عمر سرویس‌دهی عرشه پل از ۲۰ به ۳۵ سال بود. با توجه به آن که مواد تغییر فزادنده مستقیماً اثر فیزیکی روی ریزساختار بتن می‌گذارند، میکروسیتی بهترین ابزار برای دیدن و اندازه‌گیری این اثرات، آن هم بدون تخریب نمونه، محسوب می‌شود.

۴-۳. چالش‌ها و فرصت‌ها

توموگرافی کامپیوتری اشعه ایکس باید در سال‌های آینده با چند چالش هیجان‌انگیز روبه‌رو شود. البته با توجه به ماهیت چند مقیاسی مواد سیمانی، بهبود دقت فضایی همیشه مورد استقبال قرار می‌گیرد. مطالعات زمانی نیز اخیراً توجه زیادی را به‌خود جلب کرده است و

ما معتقدیم که این پیشرفت‌ها بدون شک دیدگاه جدیدی در مورد مشکلاتی مانند هیدراتاسیون خمیر سیمان یا خزش ماتریس سیمانی ارائه می‌دهند. ما همچنین امید زیادی به نقشه‌برداری شیمیایی سه‌بعدی داریم. توموگرافی کامپیوتری اشعه ایکس برای تولید مقدار زیادی داده شناخته شده است که این مورد با آزمایش‌هایی که به ترتیب تصاویر ۴ بعدی و چند طیفی ارائه می‌دهند، با زمان و آزمایش‌های شیمیایی تشدید می‌شود. پردازش این داده‌ها وظیفه‌ای است که نباید نادیده گرفته شود و احتمالاً تکنیک‌های محاسباتی مبتکرانه مانند یادگیری ماشینی نقش کلیدی در آن ایفا خواهند کرد.

منابع

- [1]. Hsieh, J. (2003). "Computed tomography: principles, design, artifacts, and recent advances".
- [2]. Peyrin, F.; Salome, M.; Cloetens, P.; Laval-Jeantet, A.; Ritman, E.; Ruegsegger, P. (1998). "Micro-CT examinations of trabecular bone samples at different resolutions :14, 7 and 2 micron level," *Technology and Health Care*, 6(5-6), PP. 391-401.
- [3]. Ritman, E.L. (2011). "Current status of developments and applications of micro-CT," *Annual review of biomedical engineering*, 13, PP. 531-552.
- [4]. Bossa, N.; Chaurand, P.; Vicente, J.; Borschneck, D.; Levard, C.; Aguerre-Chariol, O.; Rose, J. (2015). "Micro-and nano-X-ray computed-tomography: A step forward in the characterization of the pore network of a leached cement paste," *Cement and Concrete Research*, 67, PP. 138-147.
- [5]. Han, T.-S.; Zhang, X.; Kim, J.-S.; Chung, S.-Y.; Lim, J.-H.; C. Linder (2018). "Area of lineal-path function for describing the pore microstructures of cement paste and their relations to the mechanical properties simulated from μ -CT microstructures," *Cement and Concrete Composites*, 89, PP. 1-17.
- [6]. Gallucci, E.; Scrivener, K.; Groso, A.; Stambanoni, M.; Margaritondo, G. (2007). "3D experimental investigation of the microstructure of cement pastes using synchrotron X-ray microtomography (μ CT)," *Cement and Concrete Research*, 37(3), PP. 360-368.
- [7]. Du Plessis, A.; Olawuyi, B.J.; Boshoff, W.P.; Le Roux, S.G. (2016). "Simple and fast porosity analysis of concrete using X-ray computed tomography," *Materials and structures*, 49(1), PP. 553-56.
- [8]. Chung, S.-Y.; Lehmann, C.; Abd Elrahman, M.; Stephan, D. (2018). "Microstructural characterization of foamed concrete with different densities using microscopic techniques," *Cem. Wapno Beton*, 3, PP. 216-225.
- [9]. Kim, J.-S.; Chung, S.-Y.; Stephan, D.; Han, T.-S. (2019). "Issues on characterization of cement paste microstructures from μ -CT and virtual experiment framework for evaluating mechanical properties," *Construction and Building Materials*, 202, 82-102.
- [10]. Leite, M.; Monteiro, P. (2016). "Microstructural analysis of recycled concrete using X-ray microtomography," *Cement and Concrete Research*, 81, PP.38-48.
- [11]. Wan, K.; Xu, Q. (2014). "Local porosity distribution of cement paste characterized by X-ray micro-tomography," *Science China Technological Sciences*, 57(5), PP. 953-961.
- [12]. Olawuyi, B.J.; Boshoff, W.P. (2017). "Influence of SAP content and curing age on air void distribution of high performance concrete using 3D volume analysis," *Construction and Building Materials*, 135, PP. 580-589.
- [13]. Viejo, I.; Esteves, L.P.; Laspalas, M.; Bielsa, J.M. (2016). "Numerical modelling of porous cement-based materials by superabsorbent polymers," *Cement and Concrete Research*, 90, PP. 184-193.
- [14]. Lanzón, M.; Cnudde, V.; De Kock, T.; Dewanckele, J. (2015). "Microstructural examination and potential application of rendering mortars made of tire rubber and expanded polystyrene wastes," *Construction and building materials*, 94, PP. 817-825.
- [15]. Rattanasak, U.; Kendall, K. (2005). "Pore structure of cement/pozzolan composites by X-ray microtomography," *Cement and concrete research*, 35(4), PP. 637-640.
- [16]. Kupwade-Patil, K.; Palkovic, S.D.; Bumajdad, A.; Soriano, C.; Büyüköztürk, O. (2018). "Use of silica fume and natural volcanic ash as a replacement to Portland cement: Micro and pore structural investigation using NMR, XRD, FTIR and X-ray microtomography," *Construction and Building Materials*, 158, PP. 574-590.
- [17]. Ferrari, G.; Valentini, Russo, L. V.; Dalconi, M.C.; Favero, M.; Artioli, G. (2017). "Improving the performance of PCE superplasticizers in early stiffening Portland cement," *Construction and Building Materials*, 130, PP. 83-91.
- [18]. Maaroufi, M.; Abahri, K.; El Hachem, C.; Belarbi, R. (2018). "Characterization of EPS lightweight concrete microstructure by X-ray tomography with consideration of thermal variations," *Construction and Building Materials*, 178, PP. 339-348.
- [19]. Melo, J.P.; Aguilar, A.S.; Olivares, F.H. (2014). "Rheological properties of aerated cement pastes with fly ash, metakaolin and sepiolite additions," *Construction and Building Materials*, 65, PP. 566-573.
- [20]. H. Rifai, A. Stauder, D. Meinel, B. Illerhaus, G. Bruno, In-situ pore size investigations of loaded porous concrete with non-destructive methods, *Cement and Concrete Research* 111 (2018) 72-80.

- [21].Calderón, V.; Gutiérrez-González, S.; Rodriguez, A.; Horgnies, M.; "Study of the microstructure and pores distribution of lightweight mortar containing polymer waste aggregates," *WIT Transactions on Engineering Sciences*, 77, PP. 263-272.
- [22].She, W.; Du, Y.; Miao, C.; Liu, J.; Zhao, G.; Jiang, J.; Zhang, Y. (2018). "Application of organic-and nanoparticle-modified foams in foamed concrete: reinforcement and stabilization mechanisms," *Cement and Concrete Research*, 106, PP. 12-22.
- [23].Korat, L.; Ducman, V. (2017). "The influence of the stabilizing agent SDS on porosity development in alkali-activated fly-ash based foams," *Cement and Concrete Composites*, 80, PP. 168-174.
- [24].Chung, S.-Y.; Han, T.-S.; Kim, S.-Y. (2015). "Reconstruction and evaluation of the air permeability of a cement paste specimen with a void distribution gradient using CT images and numerical methods," *Construction and Building Materials*, 87, PP. 45-53.
- [25].Chalencon, F.; Dumont, P.; Orgéas, L.; Foray, G.; Cavaillé, J.-Y.; Maire, E. (2016). "Homogeneous and heterogeneous rheology and flow-induced microstructures of a fresh fiber-reinforced mortar," *Cement and Concrete Research*, 82, PP. 130-141.
- [26].Wei, S.; Yiqiang, C.; Yunsheng, Z.; Jones, M. (2013). "Characterization and simulation of microstructure and thermal properties of foamed concrete," *Construction and building materials*, 47, PP. 1278-1291.
- [27].Das, S.; Yang, P.; Singh, S.S.; Mertens, J.C.; Xiao, X.; Chawla, N.; Neithalath, N. (2015). "Effective properties of a fly ash geopolymer: Synergistic application of X-ray synchrotron tomography," *nanoindentation, and homogenization models, Cement and Concrete Research*, 78, PP. 252-262.
- [28].Sierra Beltran, M.; Schlangen, H. (2021). *Fibre-matrix interface properties in a wood fibre reinforced cement matrix*, FraMCos-7: Proceedings of the 7th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures, Jeju Island, Korea.
- [29].Van Mier, J.; Ruiz, G.; Andrade, C.; Yu, R.; Zhang, X. *3d Measurements to Determine Micromechanical Energy Dissipation in Steel Fiber Reinforced Concrete*, VIII International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures, pp. 1-11.
- [30].Hernández-Cruz, D.; Hargis, C.W.; Bae, S.; Itty, P.A.; Meral, C.; Dominowski, J.; Radler, M.J.; Kilcoyne, D.A.; Monteiro, P.J. (2014). "Multiscale characterization of chemical–mechanical interactions between polymer fibers and cementitious matrix," *Cement and Concrete Composites*, 48, PP. 9-18.
- [31].Machovic, V.; Andertova, J.; Kopecky, L.; Cerny, M.; Borecka, L.; Pribyl, O.; Kolar, F.; Svitilova, J. (2008). "Effect of aging of PET fibre on the mechanical properties of PET fibre reinforced cement composite," *Ceram. Silikaty*, 52, 172-182.
- [32].Gao, J.; Wang, Z.; Zhang, T.; Zhou, L. (2017). "Dispersion of carbon fibers in cement-based composites with different mixing methods," *Construction and Building Materials*, 134, PP. 220-227.
- [33].Sakulich, A.R.; Bentz, D.P. (2012). "Increasing the service life of bridge decks by incorporating phase-change materials to reduce freeze-thaw cycles," *Journal of Materials in Civil Engineering*, 24, PP. 1034-1042.
- [34].Aguayo, M.; Das, S.; Maroli, A.; Kabay, N.; Mertens, J.C.; Rajan, S.D.; Sant, G.; Chawla, N.; Neithalath, N. (2016). "The influence of microencapsulated phase change material (PCM) characteristics on the microstructure and strength of cementitious composites: Experiments and finite element simulations," *Cement and Concrete Composites*, 73, PP. 29-41.
- [35].Rheinheimer, V.; Wu, Y.; Wu, T.; Celik, K.; Wang, J.; De Lorenzis, L.; Wriggers, P.; Zhang, M.-H.; Monteiro, P.J. (2017). "Multi-scale study of high-strength low-thermal-conductivity cement composites containing cenospheres," *Cement and Concrete Composites*, 80, PP. 91-103.
- [36].Bennai, F.; El Hachem, C.; Abahri, K.; Belarbi, R. (2018). "Microscopic hydric characterization of hemp concrete by X-ray microtomography and digital volume correlation," *Construction and Building Materials*, 188, PP. 983-994.
- [37].Li, X.; Wang, L.; Liu, Y.; Li, W.; Dong, B.; Duan, W.H. (2018). "Dispersion of graphene oxide agglomerates in cement paste and its effects on electrical resistivity and flexural strength," *Cement and Concrete Composites*, 92, PP. 145-154.
- [38].Long, W.-J.; Gu, Y.-c.; Xiao, B.-X.; Zhang, Q.-m.; Xing, F. (2018). "Micro-mechanical properties and multi-scaled pore structure of graphene oxide cement paste: Synergistic application of nanoindentation, X-ray computed tomography, and SEM-EDS analysis," *Construction and Building Materials*, 179, PP. 661-674.
- [39].Pang, B.; Zhang, Y.; Liu, G. (2018). "Study on the effect of waterborne epoxy resins on the performance and microstructure of cement paste," *Construction and Building Materials*, 167, PP. 831-845.
- [40].Diamond, S.; Landis, E. (2007). "Microstructural features of a mortar as seen by computed microtomography," *Materials and Structures*, 40(9), PP. 983-989.
- [41].Chung, S.-Y.; Abd Elrahman, M.; Stephan, D.; Kamm, P.H. (2016). "Investigation of characteristics and responses of insulating cement paste specimens with Aer solids using X-ray micro-computed tomography," *Construction and Building Materials*, 118, PP. 2014- 2015.

- [42]. Oesch, T.; Landis, E.; Kuchma, D. (2018). "A methodology for quantifying the impact of casting procedure on anisotropy in fiber-reinforced concrete using X-ray CT," *Materials and Structures*, 51(3), PP. 1-13.
- [43]. Herrmann, H.; Pastorelli, E.; Kallonen, A.; Suuronen, J.-P. (2016). "Methods for fibre orientation analysis of X-ray tomography images of steel fibre reinforced concrete (SFRC)," *Journal of materials science*, 51(8), PP. 3772-3783.
- [44]. Bordelon, A.C.; Roesler, J.R. (2014). "Spatial distribution of synthetic fibers in concrete with X-ray computed tomography," *Cement and Concrete Composites*, 53, PP. 35-43.
- [45]. Hernández-Cruz, D.; Hargis, C.W.; Dominowski, J.; Radler, M.J.; Monteiro, P.J. (2016). "Fiber reinforced mortar affected by alkali-silica reaction: A study by synchrotron microtomography," *Cement and Concrete Composites*, 68, PP. 123-130.
- [46]. Mu, R.; Li, H.; Qing, L.; Lin, J.; Zhao, Q. (2017). "Aligning steel fibers in cement mortar using electro-magnetic field," *Construction and Building Materials*, 131, PP. 309-316.
- [47]. Erdoğan, S.; Nie, X.; Stutzman, P.; Garboczi, E. (2010). "Micrometer-scale 3-D shape characterization of eight cements: Particle shape and cement chemistry, and the effect of particle shape on laser diffraction particle size measurement," *Cement and Concrete Research*, 40(5), PP. 731-739.
- [48]. He, H.; Guo, Z.; Stroeven, P.; Stroeven, M.; Sluys, L.J. (2010). "Strategy on simulation of arbitrary-shaped cement grains in concrete," *Image Analysis & Stereology*, 29(2), PP. 79-84.
- [49]. Liu, T.; Qin, S.; Zou, D.; Song, W.; Teng, J. (2018). "Mesoscopic modeling method of concrete based on statistical analysis of CT images," *Construction and Building Materials*, 192, PP. 429-441.
- [50]. Garboczi, E. J. (2002). "Three-dimensional mathematical analysis of particle shape using X-ray tomography and spherical harmonics: Application to aggregates used in concrete," *Cement and concrete research*, 32(10), PP. 1621-1638.
- [51]. Holzer, L.; Muench, B.; Wegmann, M.; Gasser, P.; Flatt, R.J. (2006). "FIB - nanotomography of particulate systems—Part I: Particle shape and topology of interfaces," *Journal of the American ceramic society*, 89(8), PP. 2577-2585.
- [52]. Münch, B.; Gasser, P.; Holzer, L.; Flatt, R. (2006). "FIB - Nanotomography of Particulate Systems—Part II: Particle Recognition and Effect of Boundary Truncation," *Journal of the American Ceramic Society*, 89(8), PP. 2595-2586.
- [53]. Holzer, L.; Flatt, R.J.; Erdoğan, S.T.; Bullard, J.W.; Garboczi, E.J. (2010). "Shape comparison between 0.4–2.0 and 20–60 μm cement particles," *Journal of the American Ceramic Society*, 93(6), PP. 1626-1633.
- [54]. Garboczi, E.J.; Bullard, J.W. (2004). "Shape analysis of a reference cement," *Cement and concrete research*, 34(10), 1933-1937.
- [55]. Deboodt, T.; Ideker, J.H.; Isgor, O.B.; Wildenschild, D. (2017). "Quantification of synthesized hydration products using synchrotron microtomography and spectral analysis," *Construction and Building Materials*, 157, PP. 476-488.
- [56]. Moradian, M.; Hu, Q.; Aboustait, M.; Ley, M.T.; Hanan, J.C.; Xiao, X.; Scherer, G.W.; Zhang, Z. (2017). "Direct observation of void evolution during cement hydration," *Materials & Design*, 136, PP. 137-149.
- [57]. Chotard, T.J.; Smith, A.; Gault, C.; Boncoeur-Martel, M.; Dupuy, J. (2002). "Application of X-ray computed tomography for evaluating density-gradient formation during hydration of aluminous cement at the young age," *Key Engineering Materials*, PP. 206-213.
- [58]. Chotard, T.; Smith, A.; Boncoeur, M.; Fargeot, D.; Gault, C. (2003). "Characterisation of early stage calcium aluminate cement hydration by combination of non-destructive techniques: acoustic emission and X-ray tomography," *Journal of the European Ceramic Society*, 23(13), PP. 2221-2223.
- [59]. Helfen, L.; Dehn, F.; Mikulik, P.; Baumbach, T. (2005). "Three-dimensional imaging of cement microstructure evolution during hydration," *Advances in Cement Research*, 17(3), PP. 103-111.
- [60]. D. Gastaldi, F. Canonico, L. Capelli, E. Boccaleri, M. Milanese, L. Palin, G. Croce, F. Marone, K. Mader, M. Stampanoni, In situ tomographic investigation on the early hydration behaviors of cementing systems, *Construction and Building Materials* 29 (2012) 284-290.
- [61]. Brisard, S.; Serdar, M.; Monteiro, P.J. (2020). "Multiscale X-ray tomography of cementitious materials: A review," *Cement and Concrete Research*, 128, 105824.
- [62]. Vicente, M.A.; González, D.C.; Mínguez, J. (2019). "Recent advances in the use of computed tomography in concrete technology and other engineering fields," *Micron* 118, PP. 22-34.
- [63]. Chung, S.-Y.; Kim, J.-S.; Stephan, D.; Han, T.-S. (2019). "Overview of the use of micro-computed tomography (micro-CT) to investigate the relation between the material characteristics and properties of cement-based materials," *Construction and Building Materials*, 229, 116843.
- [64]. du Plessis, A.; Boshoff, W.P. (2019). "A review of X-ray computed tomography of concrete and asphalt construction materials," *Construction and Building Materials*, 199, PP. 637-651.