

# کنترل سلامت اعضاء سازه‌یی به روش توموگرافی اشعه‌ی ایکس

سید سجاد کمالی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

دکتر فریبرز ناطقی الهی\* (استاد)

پژوهشکده‌ی مهندسی سازه، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران.

مهندسی عمران شریف، (پاییز ۱۴۰۳)  
دوره‌ی ۴۰، شماره‌ی ۳، صص ۸۴-۹۴، (پژوهشی)

در نوشتار حاضر، به بررسی کارایی توموگرافی کامپیوتری اشعه‌ی ایکس در بازرسی سازه‌های شهری و سازه‌های ساختمانی پرداخته شده است. توموگرافی اشعه‌ی ایکس، یک روش غیرمخرب براساس جذب اشعه‌ی ایکس است، که کاربرد فراوانی در زمینه‌ی پزشکی دارد. با استفاده از روش اخیر می‌توان به مطالعه و بررسی ساختار داخلی سازه‌های قدیمی در جهت رفع عیوب و حفظ ایمنی ساکنان و همچنین نگهداری هر چه بهتر آن‌ها پرداخت؛ به‌طور مثال، سازه‌های شهری مانند تیرهای برق و علائم راهنمایی و رانندگی، که در اثر مخاطره‌های طبیعی و یا فرسودگی به‌طور سالانه باعث وقوع خسارت‌های مالی و یا حتی جانی می‌شوند. از ویژگی‌های روش توموگرافی اشعه‌ی ایکس می‌توان به دقت و سرعت بالای آن در بررسی عضو اشاره کرد. با توجه به قابلیت‌های روش مذکور، در پژوهش حاضر با استفاده از یک دستگاه بازرسی چمدان در محل فرودگاه مهرآباد، به بررسی تعدادی نمونه‌ی بتنی و چوبی جهت شناسایی عیوبی، مانند: ترک، حفره‌ها، و یا گره در نمونه‌های چوبی پرداخته شده است. نتایج نشان دادند که ارتباط مستقیمی با توان دستگاه و مدت تابش اشعه به نمونه وجود دارد. با توجه به نتایج می‌توان عیوبی، مانند: ترک در بتن و یا گره در چوب را مشاهده کرد.

ss.kamali@stu.iiees.ac.ir

nateghi@iiees.ac.ir

واژگان کلیدی: غیرمخرب، اشعه‌ی ایکس، توموگرافی کامپیوتری، زلزله، مخرب، سازه، عیوب سازه‌یی.

## ۱. مقدمه

می‌شوند، و اغلب با افتادن بر روی معابر و یا ماشین‌ها باعث خسارت‌هایی می‌شوند. در شکل ۱، می‌توان نمونه‌یی از این اتفاق را مشاهده کرد که در اثر وزش باد، یک تابلوی مسیرنما سقوط کرده است.

برای شناسایی عیوب مذکور، روش‌های متفاوتی وجود دارد، که به‌طور کلی می‌توان آن‌ها را به دو دسته‌ی مخرب و غیرمخرب تقسیم کرد. روش‌های مخرب، شامل روش‌هایی هستند که نیازمند نمونه‌گیری و گریزی از سازه هستند و به همین دلیل روش‌هایی زمانبر هستند و احتمال ایجاد آسیب بیشتر به سازه در روش‌های مخرب وجود دارد.

روش‌های غیرمخرب، شامل روش‌هایی هستند که بدون هیچ‌گونه آسیب اضافی به سازه و همچنین در کمترین زمان ممکن، می‌توان با استفاده از آن‌ها، سازه‌ی موردنظر را بررسی و در جهت رفع عیوب احتمالی اقدام کرد. یکی از روش‌های غیرمخرب، که امروزه در مورد کارایی آن بحث می‌شود، استفاده از توموگرافی کامپیوتری اشعه‌ی ایکس جهت شناسایی عیوب داخلی سازه‌هاست.

بتن و فولاد از پرکاربردترین مصالح مورد استفاده در صنعت عمران هستند، که در سازه‌های مختلفی، مانند: ساختمان‌ها، پل‌ها، سازه‌های شهری، و ... استفاده می‌شوند. به‌طور کلی سازه‌ها عمر مفیدی دارند، که در این مدت و پس از آن، نیازمند بررسی‌هایی جهت حفظ کارایی خود هستند. علاوه بر این، سازه‌ها ممکن است در مدت عمر مفید خود، تحت اثر مخاطره‌های طبیعی، مانند: سیل و زلزله قرار بگیرند و در اثر آن‌ها، وقوع خسارت در سازه‌ها محتمل است. از جمله‌ی خسارت‌های ذکر شده می‌توان به زنگ‌زدگی فولاد، ایجاد ترک در بتن، شکست جوش، و ... اشاره کرد. به عنوان مثال، سازه‌های شهری مانند تیرهای برق و یا علائم راهنمایی و رانندگی، که به‌طور مداوم تحت اثر عوامل خارجی، مانند باد، باران و یا ممکن است تحت اثر سیل و زلزله قرار گیرند، عیوبی رخ می‌دهد که نیازمند بازرسی و رفع آن‌ها قبل از وقوع خسارت‌های جانی و مالی است. و یا درختان قدیمی، که در اثر باد و باران و به‌علت پوسیدگی داخلی دچار شکستگی

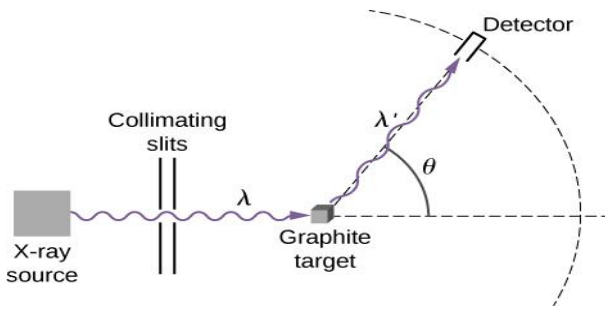
\*نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۲۶، تاریخ اصلاحیه: ۱۴۰۲/۰۷/۲۶، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۸/۲۰.

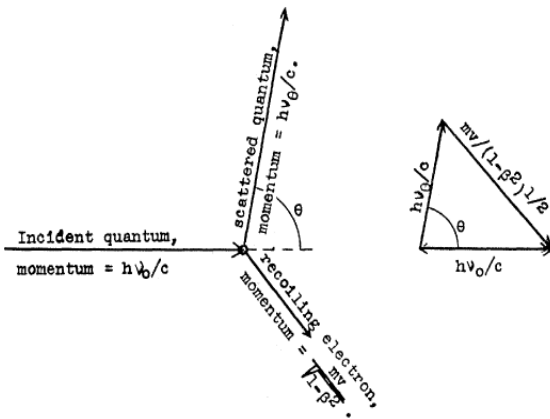
استناد به این مقاله:

کمالی، سید سجاد و ناطقی الهی، فریبرز، ۱۴۰۳. کنترل سلامت اعضاء سازه‌یی به روش توموگرافی اشعه‌ی ایکس، مهندسی عمران شریف، ۴۰(۳)،

صص ۸۴-۹۴. DOI: 10.24200/j30.2023.63074.3254



شکل ۲. شماتیک وقوع پراکندگی کامپتون.<sup>[۲]</sup>



شکل ۳ (الف و ب). نمایی از تکانه‌های ورودی و خروجی.<sup>[۲]</sup>

منحرف و اندازه‌ی طول موج توسط یک آشکارساز معلوم می‌شود. همان‌طور که در شکل مذکور مشاهده می‌شود، طول موج پرتو اشعه‌ی ایکس پس از برخورد با نمونه افزایش یافته است و بدین معناست که پرتوهای اشعه‌ی ایکس بعد از برخورد، انرژی کمتری دارند و همین تفاوت انرژی در نواحی مختلف یک نمونه و شناسایی آن توسط آشکارساز، باعث ایجاد یک تصویر از نمونه و جزئیات داخلی آن می‌شود.

براساس نظریه‌ی فیزیک کوانتومی، هر فوتون از اشعه‌ی ایکس، یک تکانه‌ی فرودی  $\frac{h\nu}{c}$  دارد، که در آن،  $h$  ثابت پلانک،  $\nu$  بسامد اشعه، و  $c$  سرعت نور است، که توسط الکترونی به جرم  $m$  پراکنده می‌شود.<sup>[۲]</sup> پس از برخورد، تکانه‌ی خروجی برابر  $\frac{h\nu_\theta}{c}$  است. با توجه به شکل ۳ (الف و ب)، اشعه‌ی پراکنده‌شده نسبت به اشعه‌ی اولیه، زاویه‌ی  $\theta$  خواهد داشت.

با توجه به شکل اخیر، می‌توان رابطه‌ی ۱،<sup>[۲]</sup> را اثبات کرد:

$$\left(\frac{m\beta c}{\sqrt{1-\beta^2}}\right)^2 = \left(\frac{h\nu}{c}\right)^2 + \left(\frac{h\nu_\theta}{c}\right)^2 + 2\frac{h\nu}{c} \cdot \frac{h\nu_\theta}{c} \cos \theta \quad (1)$$

که در آن،  $\beta$  برابر نسبت سرعت پس‌زدن الکترون به سرعت نور است. در ادامه، می‌توان با توجه به رابطه‌ی ۲،<sup>[۲]</sup> نتیجه گرفت که انرژی فوتون پراکنده‌شده نسبت به انرژی فوتون فرودی کمتر است:

$$h\nu_\theta = h\nu - mc^2 \left( \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} - 1 \right) \quad (2)$$

با توجه به روابط ۱ و ۲ رابطه‌ی ۳،<sup>[۲]</sup> به‌دست می‌آید:



شکل ۱. نمایی از سقوط تابلوی مسیرنما در اثر ورزش باد.

بنابر نظر لیچنسکی،<sup>[۱]</sup> روش‌های غیرمخرب نسبت به روش‌های مخرب، این مزایا را دارند:

- ۱- کاهش نیاز به نیروی کار آزمایشگاهی،
- ۲- کاهش نیروی کار جهت کارهای مقدماتی،
- ۳- کمترین میزان آسیب به سازه در حین آزمایش،
- ۴- کمترین احتمال آسیب به سازه، که نیازمند تقویت و ترمیم باشد،
- ۵- امکان بررسی مقاومت بتن در سازه‌هایی که نمی‌توان از آن‌ها مغزه‌گیری کرد،
- ۶- هزینه‌ی کمتر تجهیزات و آزمایش.

با توجه به دلایل ذکرشده، روش‌هایی لازم هستند که بتوانند دید مناسبی از داخل مقطع موردنظر ارائه کنند، تا در جهت رفع عیوب احتمالی، اقدام‌های لازم صورت گیرد. هدف از انجام پروژه‌ی حاضر، بررسی کارایی توموگرافی کامپیوتری اشعه‌ی ایکس در زمینه‌ی کنترل و بازرسی اعضاء سازه‌ی به‌صورت غیرمخرب است. توموگرافی کامپیوتری به معنای نمایش یک برش از یک جسم به صورت کامپیوتری است؛ به این معنا که در روش مذکور، یک سری تصاویر مقطعی با عبور فوتون‌ها از یک قسمت از نمونه و شمارش آن‌ها توسط آشکارساز و ارسال آن‌ها به کامپیوتر جهت آنالیز ساخته می‌شوند. فرآیندی که باعث تفاوت انرژی فوتون‌های اشعه‌ی ایکس قبل و بعد از عبور از مقطع موردنظر و در نتیجه، تفاوت رنگ در تصویر به‌دست‌آمده می‌شود، پراکندگی کامپتون<sup>۱</sup> نام دارد.

### ۱.۱. پراکندگی کامپتون

پراکندگی کامپتون، عنوانی است که به از دست‌رفتن انرژی پرتوهای ایکس در نتیجه‌ی برخورد به یک ماده گفته می‌شود. طبق فیزیک کلاسیک، هنگامی که یک موج الکترومغناطیسی به اتم‌های ماده برخورد کند، طول موج پرتو نوری پخش‌شده باید برابر با طول موج فرودی باشد. برخلاف پیش‌بینی اخیر توسط فیزیک کلاسیک، مشاهده‌ها نشان می‌دهند که در هنگام برخورد موجی با طول موج مشخص به ماده‌ی، طول موج پرتوهای منحرف‌شده با طول موج ورودی تفاوت دارند.

در شکل ۲، شماتیک آزمایش وقوع پراکندگی مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، نحوه‌ی انجام آزمایش بسیار ساده است. در حقیقت، در ابتدا امواج  $X$  با طول موج  $\lambda$  به الکترون‌های نمونه‌ی برخورد داده می‌شوند. در نتیجه، امواج  $X$  با اتم‌های نمونه برهمکنش نشان می‌دهند و امواجی با طول موج جدید  $\lambda'$ ،

<sup>۱</sup> Compton scattering

(۲۰۱۳)<sup>[۱۰]</sup>، تأثیر کربناته‌شدن بتن در ایجاد ترک در آن را بررسی کردند و دریافته‌اند که با افزایش عمق کربناته‌شدن، میزان تخلخل در نمونه به‌علت پُردن منافذ با کربنات کلسیم و آب تولیدشده در اثر واکنش‌های کربناته‌شدن به‌شدت کاهش یافته است. همچنین توزیع ترک‌ها در امتداد جهت کربناته‌شدن به‌دلیل انقباض ناشی از واکنش کربناته‌شده است و با افزایش زمان کربناته‌شدن، حجم و سطح ترک‌ها بزرگ‌تر می‌شود. پوینارد<sup>۸</sup> و همکاران (۲۰۱۲)<sup>[۱۱]</sup> آسیب‌های مزوساختاری، در اثر آزمایش سه‌محوری در بتن را بررسی کردند. روسی<sup>۹</sup> و همکاران (۲۰۲۰)<sup>[۱۲]</sup> در بررسی خوردگی آرماتورهای یک مقطع بتن مسلح ۲۰ ساله، نشان دادند که میزان خوردگی در نواحی کناری و مناطقی که ترک وجود دارد، بیشتر است. همچنین، سیریا به<sup>۱۰</sup> و همکاران (۲۰۲۰)<sup>[۱۳]</sup> اعماق افتادگی جوش در مقاطع جوش داده‌شده و یوگار کالیگولو<sup>۱۱</sup> و همکاران (۲۰۱۶)<sup>[۱۴]</sup> مقاطع جوش داده‌شده با جوش اصطکاکی را بررسی کردند. ینومولا<sup>۱۲</sup> و همکاران (۲۰۱۹)<sup>[۱۵]</sup> در بررسی اتصال‌های یک مخزن انبساط استوانه‌یی، که با استفاده از روش قوس تنگستن جوشکاری شده بود، عیوبی مانند: آخال تنگستن و عدم وجود خطوط همجوشی<sup>۱۳</sup> را مشاهده کردند. سوزا<sup>۱۴</sup> و همکاران (۲۰۰۹)<sup>[۱۶]</sup> عدم همجوشی در جوش لوله‌های فولادی را ملاحظه کردند. دیدژیوکاس<sup>۱۵</sup> و همکاران (۲۰۰۸)<sup>[۱۷]</sup> در پژوهشی به شناسایی عیوبی، مانند: نفوذ سرباره، ناپیوستگی جوش، و حفره‌های گاز در مقاطع جوش داده‌شده پرداختند. ترکمن<sup>۱۶</sup> و همکاران (۲۰۱۹)<sup>[۱۸]</sup> نیز در بررسی عیوب جوش‌ها دریافته‌اند که رایج‌ترین عیب موجود در مقاطع جوش داده‌شده، عدم نفوذ جوش است. دیپاک<sup>۱۷</sup> و همکاران (۲۰۲۱)<sup>[۱۹]</sup> به بررسی جوش‌های قوس فلزی با گاز محافظ<sup>۱۸</sup>، قوسی تنگستن گازی، و جوشکاری با پرتو لیزری<sup>۱۹</sup> پرداختند و دریافته‌اند که جوشکاری با پرتو لیزری نسبت به دو روش دیگر بدون عیب بوده است. یامادا<sup>۲۰</sup> و همکاران (۲۰۱۲)<sup>[۲۰]</sup> نیز در بررسی اتصال‌های جوش داده‌شده در حین جوشکاری لیزری، عیوبی مانند ترک در جوش و وجود حباب را ملاحظه کردند و دریافته‌اند که به‌دلیل تفاوت چگالی بین فاز مایع و جامد فولاد، امکان مشاهده‌ی خطوط همجوشی وجود دارد. همچنین، استریت<sup>۲۱</sup> و همکاران (۲۰۱۶)<sup>[۲۱]</sup> کیفیت، شکل، و عمق جوشکاری لیزری، و برناچی<sup>۲۲</sup> و همکاران (۲۰۲۰)<sup>[۲۲]</sup> نیز وقوع خوردگی آرماتورها به‌علت وجود ترک در مقاطع بتن مسلح را بررسی کردند. میچل<sup>۲۳</sup> و همکاران (۲۰۱۱)<sup>[۲۳]</sup> هم در پژوهش خود، ترک خوردگی مقاطع بتن مسلح ناشی از خوردگی تسریع‌شده‌ی آرماتورها را ملاحظه کردند. دانگ<sup>۲۴</sup> و همکاران (۲۰۱۷)<sup>[۲۴]</sup> نیز به بررسی خوردگی تسریع‌شده‌ی آرماتورها در نمونه‌ی بتن مسلح و آسیب‌های ناشی از آن در پوشش نمونه پرداختند.

$$v_{\theta} = \frac{v}{1 + \alpha \sin^2 \frac{1}{2} \theta} \quad (3)$$

که در آن،  $\alpha$  مطابق رابطه‌ی ۴ به‌دست می‌آید:<sup>[۲]</sup>

$$\alpha = \frac{hv}{mc^2} = \frac{h}{mc\lambda} \quad (4)$$

با توجه به رابطه‌های ۳ و ۴ می‌توان نتیجه گرفت که طول موج اشعه‌ی خروجی از الکترون بیشتر از طول موج ورودی است (رابطه‌ی ۵):<sup>[۲]</sup>

$$\lambda_{\theta} = \lambda + \left(\frac{2h}{mc}\right) \sin^2 \frac{1}{2} \theta \quad (5)$$

پس از جذب اشعه‌ی ایکس عبوری از هر قسمت از جسم موردنظر، پارامترهای توموگرافی کامپیوتری اشعه‌ی ایکس براساس اعدادی کمی‌سازی می‌شوند، که این اعداد در واحد هانسفیلد (HU)<sup>۱</sup> به‌دست می‌آیند. اعداد به‌دست‌آمده، نشان‌دهنده‌ی میانگین جذب اشعه‌ی ایکس مربوط به هر ناحیه یا توجه به خواص مواد در آن ناحیه هستند. به‌طور مثال، این عدد برای آب برابر ۰ و برای هوا ۱۰۰۰- است و بیشترین مقدار آن برابر ۳۰۰۰ است. سپس تصاویر در مقیاس خاکستری به‌دست می‌آیند، که نواحی با مقدار هانسفیلد پایین، تاریک-تر و نواحی با مقدار هانسفیلد بالاتر، روشن‌تر نمایش داده می‌شوند.

هدف از نوشتار حاضر، بررسی کارایی روش ذکرشده در شناسایی عیوبی، مانند: ترک در بتن و خوردگی آرماتورها در مقاطع بتن مسلح، و یا عیوب جوش در مقاطع فولادی و یا عیوبی مانند گره در مقاطع چوبی است. در زمینه‌ی بررسی عیوب بتن و فولاد مطالعاتی صورت گرفته است. کالیسکان<sup>۲</sup> (۲۰۰۷)<sup>[۴]</sup> تأثیر مکان را در تخلخل و مقاومت و تفاوت ساختار داخلی هسته‌های بتنی بررسی کرد و با استفاده از توموگرافی اشعه‌ی ایکس مشخص شد که میزان تخلخل در نواحی پایینی کمتر از نواحی بالایی یک ستون بتنی با میزان تراکم بیشتر است. بالاز<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۱۸)<sup>[۵]</sup> به بررسی تغییرات مقدار هانسفیلد در اثر تماس با آتش و زوال ناشی از خوردگی آرماتورها در مقاطع بتن مسلح پرداختند. سوزوکی<sup>۴</sup> و همکاران (۲۰۱۷)<sup>[۶]</sup> به بررسی توزیع ترک در یک دیوار بتن مسلح ناشی از فرآیند ذوب و انجماد پرداختند. کیان وی<sup>۵</sup> و همکاران (۲۰۱۱)<sup>[۷]</sup> گسترش ترک در نمونه‌های بتنی راه تحت بار فشاری تک‌محوری و شی<sup>۶</sup> و همکاران (۲۰۱۹)<sup>[۸]</sup> خوردگی آرماتورها در گوشه‌ی مقاطع بتن مسلح را بررسی کردند و دریافته‌اند که کمتر از ۲۰٪ آسیب‌ها ناشی از شکستگی فیبرها و بیشتر از ۸۰٪ آسیب‌ها ناشی از جداسازی در بتن است و همچنین وجود حفره‌ها در بتن، وقوع ترک‌های اولیه را تسهیل می‌کند. هان<sup>۷</sup> و همکاران

<sup>13</sup> LOF (lack of fusion lines)

<sup>14</sup> Souza

<sup>15</sup> Didžiokas

<sup>16</sup> Türkmen

<sup>17</sup> Deepak

<sup>18</sup> GMAW (Gas Metal Arc Welding)

<sup>19</sup> LBW (Laser beam welding)

<sup>20</sup> Yamada

<sup>21</sup> Stritt

<sup>22</sup> Bernachy

<sup>23</sup> Michel

<sup>24</sup> Dong

<sup>1</sup> Hansfeld Unit

<sup>2</sup> Caliskan

<sup>3</sup> Balázs

<sup>4</sup> Suzuki

<sup>5</sup> Qiang Wei

<sup>6</sup> Xi

<sup>7</sup> Han

<sup>8</sup> Poinard

<sup>9</sup> Rossi

<sup>10</sup> Siryabe

<sup>11</sup> Ugur Caligulu

<sup>12</sup> Yenumula

پوسیدگی ناشی از قارچ‌زدگی را بررسی کردند. گرینر<sup>۸</sup> و همکاران (۲۰۰۹)،<sup>[۳۳]</sup> با استفاده از روش میکرو توموگرافی اشعه‌ی ایکس به بررسی یک کلبه‌ی چوبی پرداختند. پاراچا<sup>۹</sup> و همکاران (۲۰۲۱)،<sup>[۳۳]</sup> مقاطع چوبی را که مورد حمله‌ی آنوبیید<sup>۱۰</sup> (نوعی حشره) قرار گرفته بودند، بررسی کردند. در پژوهشی که توسط شرکت فورینتک کانادا<sup>۱۱</sup>،<sup>[۳۴]</sup> انجام شد، عیوب داخلی چوب و همچنین میزان تراکم چوب ملاحظه شد.

## ۲. پردازش اشعه‌ی ایکس

پس از تابش اشعه‌ی ایکس به وسیله‌ی تیوب، اشعه‌ی ایکس تولید می‌شود. با برخورد اشعه‌ی تولیدشده به جسم مورد نظر، اشعه‌ی اولیه مقداری از انرژی اولیه‌ی خود را از دست می‌دهد. مطابق با قانون بیرلامبرت، شدت اشعه‌ی ایکسی که از یک جسم عبور می‌کند، مطابق با رابطه‌ی ۶،<sup>[۳۵]</sup> محاسبه می‌شود:

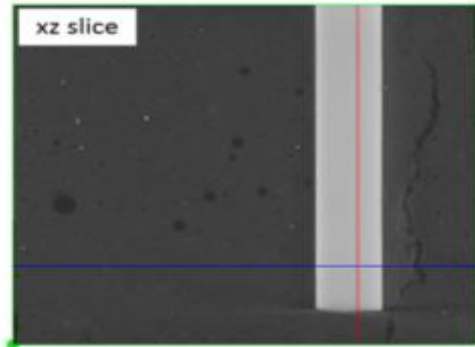
$$I = I_0 \cdot e^{-\mu x} \quad (6)$$

که در آن،  $I$  شدت اشعه‌ی ایکس پس از عبور از جسم،  $I_0$  شدت اشعه‌ی ایکس قبل از جسم،  $\mu$  ضریب تضعیف خطی در طول نمونه هستند. ضریب تضعیف، در هر نقطه‌ی از جسم که از آن عبور می‌کند، به چگالی ( $\rho$ ) آن نقطه بستگی دارد. نسبت  $\frac{\mu}{\rho}$  تقریباً با  $Z^3$  متناسب است، که  $Z$  برابر با عدد اتمی عنصر است.<sup>[۳۶]</sup>

با توجه به رابطه‌ی بیان شده می‌توان علت تفاوت رنگ در نواحی مختلف یک جسم را توجیه کرد. به‌طور مثال، در یک نمونه‌ی بتن مسلح در تصاویر سیاه و سفید، بخش‌های بتنی به رنگ سیاه و بخش‌های فلزی به رنگ سفید نمایش داده می‌شوند، زیرا فلز تمام اشعه را جذب خود می‌کند و میزان انرژی عبوری به صفر می‌رسد. به همین علت در نواحی مختلف تصاویر به‌دست آمده به وسیله‌ی آشکارساز به‌صورت سفید نمایش داده می‌شود. این تذکر لازم است که اگر عیوبی در نواحی فلزی وجود داشته باشد، مانند خوردگی آرماتور، قابل تشخیص است.

## ۳. نمونه‌ها

با توجه به مطالب بیان شده، در پژوهش حاضر، به‌منظور بررسی کارایی اشعه‌ی ایکس در شناسایی عیوب سازه‌ی، از تعدادی نمونه‌ی آزمایشگاهی بتن مسلح و چوبی استفاده شده است. نمونه‌های بتن مسلح شامل دو نمونه‌ی استوانه‌ی با ارتفاع ۵۴ و قطر ۱۵ سانتی‌متر بودند، که در مرکز هر کدام از آن‌ها دو آرماتور با قطر ۱۴ میلی‌متر به وسیله‌ی کوپلر (وصله‌ی مکانیکی) به یکدیگر متصل شده‌اند و یک نمونه‌ی بتن مسلح مستطیلی که در آن دو آرماتور به قطرهای ۸ و ۴ میلی‌متر قرار گرفته‌اند. همچنین نمونه‌های چوبی در پژوهش حاضر، شامل دو عدد چوب چهارتراش که ابعاد هر کدام  $۵ \times ۵ \times ۸$  سانتی-متر بوده است، می‌شود. مشخصات نمونه‌ها در جدول ۱ و نمایی از آن‌ها در شکل‌های ۵ و ۶ مشاهده می‌شود.



شکل ۴. نمایی از ترک، حفره‌ها، و آرماتور.<sup>[۸]</sup>

در شکل ۴،<sup>[۸]</sup> می‌توان نمونه‌ی از نتایج حاصل شده را مشاهده کرد. در شکل مذکور، به خوبی وجود ترک و حفره‌ها قابل شناسایی است. این نمونه به وسیله‌ی دستگاه سی تی اسکن بررسی شده است.

علاوه بر بتن و فولاد، چوب نیز از مصالحی است که در گذشته کاربرد فراوانی داشته است و اکنون نیز از آن در برخی موارد استفاده می‌شود. بازرسی و مقاوم‌سازی سازه‌های چوبی و یا آثار باستانی چوبی، اهمیت فراوانی در حفظ و نگهداری آن‌ها دارد. به‌طور کلی، سازه‌های چوبی در معرض پوسیدگی و مستعد تخریب قارچی و همچنین ترک‌خوردگی هستند. روش‌هایی جهت جلوگیری از وقوع فرآیند پوسیدگی در چوب وجود دارد؛ با این حال، روش‌های مذکور فقط این فرآیند را به تأخیر انداخته‌اند. فرآیند پوسیدگی باعث کاهش استحکام و مقاومت در چوب و در نتیجه باعث خسارت‌های زیادی می‌شود. بنابراین، بازرسی و انجام اقدام‌های مورد نیاز در جهت حفظ و نگهداری سازه‌های چوبی و یا آثار آن ضروری است.

مانند بتن و فولاد، می‌توان به راحتی با استفاده از روش توموگرافی اشعه‌ی ایکس، سازه‌های چوبی را بررسی کرد. به جز پوسیدگی و تخریب قارچی، که در درازمدت در چوب صورت می‌گیرد، در چوب‌ها عیوب دیگری مانند گره و یا ترک نیز وجود دارند، که شناسایی آن‌ها در حفظ سلامت چوب حائز اهمیت است. در این زمینه، فعالیتی‌هایی صورت گرفته است؛ که در ادامه، به تعدادی از آن‌ها اشاره شده است. مک‌گاورن<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۱۰)،<sup>[۲۵]</sup> پوسیدگی نمونه‌های چوبی در اثر قرارگیری در محیط قارچی و نیز بالک<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۰۹)،<sup>[۲۶]</sup> پوسیدگی مقاطع چوبی را بررسی کردند. سلیم و همکاران (۲۰۱۴)،<sup>[۲۷]</sup> میزان تراکم چوب در سه ناحیه‌ی مختلف از درختان را ملاحظه کردند. ریگیو<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۱۴)،<sup>[۲۸]</sup> مشکلات داخلی سازه‌ی چوبی کلیسای سنت آنه<sup>۴</sup> را بررسی کردند. چوبنسکی<sup>۵</sup> و همکاران (۲۰۱۴)،<sup>[۲۹]</sup> در پژوهشی به بررسی ساختار داخلی و عیوبی، مانند گره‌ها که در استحکام مقاطع چوبی تأثیرگذار است، پرداختند. ژی<sup>۶</sup> و همکاران (۲۰۱۸)،<sup>[۳۰]</sup> عیوب نمونه‌های چوبی چندلایه، شامل عیوبی مانند گره، ترک، و همچنین ساختار داخلی آن‌ها مانند حلقه‌های داخلی را بررسی کردند. کودنبرگ<sup>۷</sup> و همکاران (۲۰۲۰)،<sup>[۳۱]</sup>

<sup>۷</sup> Koddenberg

<sup>۸</sup> Grabner

<sup>۹</sup> Parracha

<sup>۱۰</sup> Anobiid

<sup>۱۱</sup> Forintek Canada Corp

<sup>۱</sup> McGovern

<sup>۲</sup> Bulcke

<sup>۳</sup> Riggio

<sup>۴</sup> Saint Anne's Church

<sup>۵</sup> Chubinskii

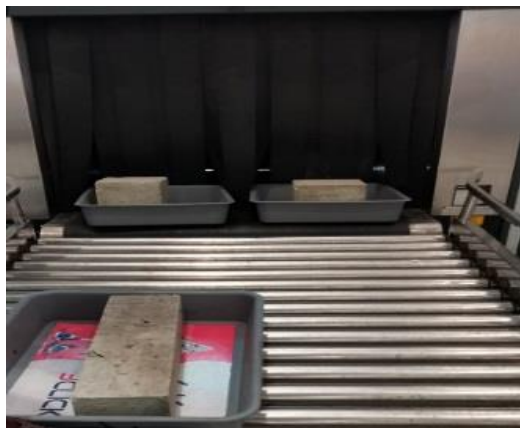
<sup>۶</sup> Ge

جدول ۲. مشخصات فنی دستگاه بازرسی بار چمدان.

مشخصات فنی دستگاه بازرسی بار چمدان	
ابعاد	طول ۳۵۸، ارتفاع ۱۸۴، عرض ۱۲۹ سانتی‌متر، ابعاد تونل ۷۷×۹۱ سانتی‌متر
توان	۱۶۰ کیلوولت
دوز اشعه‌ی ایکس ارسالی	۰/۰۰۰۸ میلی سیورت



شکل ۷. دستگاه بازرسی چمدان مدل ۹۰۷۵.



شکل ۸. نمایی از دستگاه بازرسی بار.



شکل ۹. نحوه‌ی نمایش تصویر در دستگاه بازرسی بار.

جدول ۱. مشخصات نمونه‌ها.

مشخصات	ابعاد	نوع نمونه
سیمان پرتلند نوع II	آرماتور با قطرهای ۸ و ۴ میلی‌متر	بتن مسلح مستطیلی
سیمان پرتلند نوع II	ارتفاع ۵۴ و قطر ۱۵ سانتی‌متر، آرماتور با قطر ۱۴ میلی‌متر	دو نمونه بتن مسلح استوانه‌یی
از چوب درخت گردو	با ابعاد ۵×۵×۵۷ سانتی‌متر	چوب چهارتراش ۱
از چوب درخت گردو	با ابعاد ۸×۸×۵۰ سانتی‌متر	چوب چهارتراش ۲



شکل ۵. نمونه‌ی بتن مسلح استوانه‌یی.



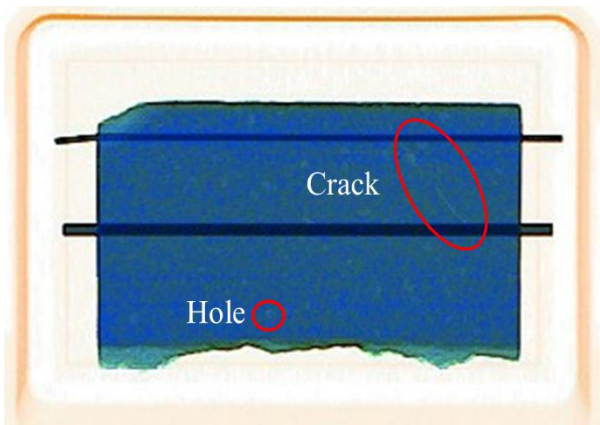
شکل ۶. نمونه‌های چوب.

۴. مشخصات و نحوه‌ی عملکرد دستگاه اشعه‌ی ایکس (بازرسی بار)

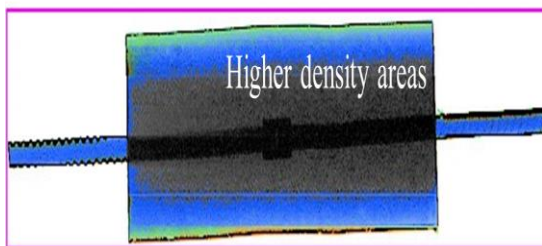
پژوهش حاضر با همکاری فرودگاه بین‌المللی مهرآباد، با استفاده از دستگاه بازرسی بار چمدان صورت گرفته است، که ساخت شرکت سمیتز دتکشن<sup>۱</sup> بوده و مشخصات آن در جدول ۲ ارائه شده است. همچنین در شکل‌های ۷ الی ۹، نمونه‌یی از این دستگاه و نحوه‌ی نمایش تصویر قابل مشاهده است.

براساس میزان تشعشعی که از چمدان عبور کرده است، یک تصویر نزدیک به زمان واقعی از اقلام ایجاد می‌شود. مواد آلی، مانند چوب، آب، پلاستیک، و

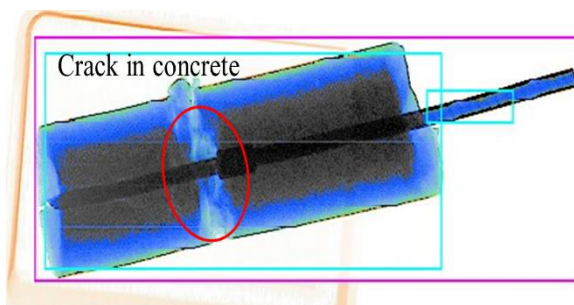
<sup>۱</sup> smiths detection



شکل ۱۰. نمایی از نتیجه‌ی تصویربرداری نمونه‌ی بتن مسلح مستطیلی.



شکل ۱۱. نمایی از نتیجه‌ی تصویربرداری نمونه‌ی بتن مسلح استوانه‌یی ۱.



شکل ۱۲. نمایی از نتیجه‌ی تصویربرداری نمونه‌ی بتن مسلح استوانه‌یی ۲.

نواحی پُررنگ‌تر باشند، تراکم در آن نواحی بیشتر است. همچنین در شکل مذکور مشاهده می‌شود که نواحی کناری بتن نسبت به نواحی مرکزی، طیف رنگی روشن‌تری دارند و هر چه به سمت مرکز نمونه حرکت شود، بتن متراکم‌تر و در نتیجه طیف رنگی تیره‌تری می‌شود. ضمناً در شکل ۱۰ نواحی‌یی وجود دارند که به‌صورت دایره‌هایی به رنگ سفید و یا خاکستری مشاهده می‌شوند، که نشان‌دهنده‌ی وجود حفره‌ها در نمونه هستند.

همچنین دو نمونه‌ی آزمایشی بتن مسلح استوانه‌یی به طول ۵۴ و قطر ۱۵ سانتی‌متر برای بررسی اتصال کوپلر آرماتورها، توسط توموگرافی کامپیوتری اشعه‌ی ایکس بررسی شدند. همان‌طور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، پس از آزمایش مشکلی در قسمت اتصال کوپلر به وجود نیامده است. در تصاویر رنگی نیز، نواحی که چگالی بالاتری نسبت به سایر نواحی داشتند، تیره‌تر مشاهده می‌شوند. مطابق شکل ۱۱، آرماتور در ناحیه‌ی داخلی بتن به‌صورت تیره‌تر و در نواحی خارجی با توجه به اینکه ماده‌ی دیگری وجود نداشت، نسبت به محیط با رنگ آب‌ی دیده می‌شوند.

منسوجات به رنگ نارنجی هستند. مواد معدنی مانند فلزات به رنگ آبی ظاهر می‌شوند. اگر مواد آلی و معدنی در مورد اسکن شده هم‌پوشانی داشته باشند، روی صفحه، سبز نشان داده می‌شود. هر چه ماده متراکم‌تر باشد یا لایه‌ی ماده در مسیر اشعه‌ی ایکس ضخیم‌تر باشد، آیتم تیره‌تر روی صفحه‌ی کامپیوتر ظاهر می‌شود. موادی که بیش از حد متراکم هستند و تابش نمی‌تواند از آن عبور کند، سیاه به‌نظر می‌رسد.

این تذکر لازم است در پژوهشی که توسط صدرا و همکاران (۲۰۱۵)، [۳۷] صورت گرفت است، میزان دوز مؤثر اشعه‌ی ایکس ارسالی توسط دستگاه سی‌تی‌اسکن در مراکز مختلف بررسی شده است. در پژوهش حاضر، مشخص شد میزان کمینه‌ی دوز مؤثر برای عضوی مانند سر برابر ۰/۳۳ میلی‌سیور است.

## ۵. نتایج بازرسی

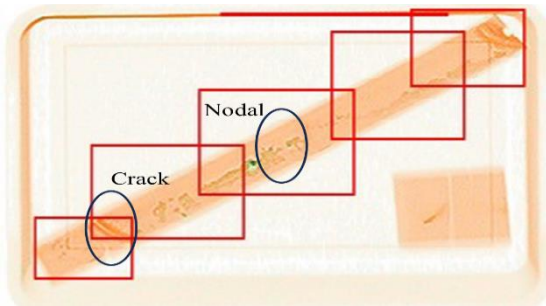
در تصاویر حاصل از توموگرافی کامپیوتری اشعه‌ی ایکس، تفاوت رنگ در نواحی مختلف جسم موردنظر، نشان‌دهنده‌ی نرخ جذب اشعه و همچنین ضریب تضعیف  $\mu$  است و همان‌طور که بیان شد، ضریب  $\mu$  به چگالی جسم موردنظر وابسته است. حجم یک جسم ناشی از حجم عناصر آن جسم و یا به عبارتی وکسل است. وکسل به کوچک‌ترین عضو ساختاری یک تصویر گفته می‌شود. در یک تصویر سیاه و سفید ناشی از توموگرافی کامپیوتری اشعه‌ی ایکس، هر چه مقادیر تصویر روشن‌تر (سفیدتر) بیشتر باشد، نشان‌دهنده‌ی آن است که نرخ جذب اشعه‌ی ایکس در آن ناحیه و به‌عبارتی دیگر، چگالی جسم در آن ناحیه بالاتر از سایر نواحی است و برعکس؛ هر چه مقادیر تصویر تیره‌تر (به سمت خاکستری یا سیاه) باشد، نشان‌دهنده‌ی آن است که چگالی جسم در آن ناحیه کمتر بوده است.

در نتایج حاصل از بازرسی به وسیله‌ی تجهیزات فرودگاه، تفاوتی در تصاویر به‌دست‌آمده با تصاویر معمول توموگرافی کامپیوتری اشعه‌ی ایکس وجود دارد. تصاویر حاصل از بازرسی مذکور به‌صورت رنگی است؛ که برعکس تصاویر معمول، که در آن‌ها نواحی با چگالی بالاتر روشن‌تر نمایش داده می‌شوند، نواحی با چگالی و تراکم بالاتر تیره‌تر مشاهده می‌شوند. همچنین در دستگاه اخیر، با توجه به نوع جسم موردبزرسی، رنگ تصاویر خروجی متفاوت است.

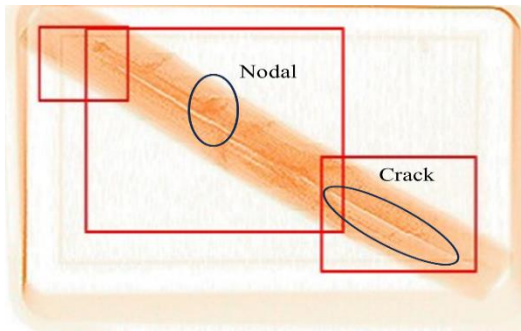
همان‌طور که بیان شد، ترک‌خوردگی در بتن از جمله عیوب آن است، که می‌توان با کمک روش ذکرشده آن را شناسایی کرد. اگر ترک در یک نمونه ایجاد شده باشد، چگالی ظاهری نمونه تغییر می‌کند، در حالی که ترک ممکن است به اندازه‌ی کوچکی باشد که شناسایی نشود. جهت بررسی نمونه‌ها در دستگاه بازرسی بار چمدان، ابتدا با قرارگرفتن نمونه‌ها بر روی ریل دستگاه، نمونه‌ها وارد محفظه‌ی بازرسی می‌شوند. با عبور نمونه‌ها در داخل محفظه، اشعه‌ی ایکس به‌طورمداوم به نمونه تابیده می‌شود و از ابتدا تا انتها، نمونه بازرسی می‌شود؛ که در ادامه، به نتایج به‌دست‌آمده اشاره شده است.

## ۱.۵. نمونه‌های بتن مسلح

همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، می‌توان یک ترک مورب در قسمت بالایی نمونه‌ی بتن مسلح را شناسایی کرد. با توجه به شکل، تغییر رنگ در ناحیه‌ی مذکور، نشانگر تغییر میزان چگالی به‌دلیل تفاوت در مشخصات نمونه در آن ناحیه است و نیز می‌توان با توجه به طیف رنگی متفاوت در شکل اخیر، میزان تراکم بتن در نواحی مختلف را مشاهده کرد. بدین صورت که هر چه



شکل ۱۳. نمایی از نمونه‌ی چوب چهار تراش ۱.



شکل ۱۴. نمایی از چوب چهار تراش ۲.

با توجه به نتایج با مشخصات این دستگاه می‌توان حفره‌ها، ترک‌ها، و سایر عیوب را شناسایی کرد.

۳. برای شناسایی عیوب ریزتر، مانند ترک‌های ریز، نیازمند تجهیزات دقیق‌تر مانند میکرو سی تی و همچنین افزایش زمان تابش است.

۴. همان‌طور که توسط صدرا و همکاران بیان شد، کمترین میزان دوز مؤثر ارسالی در دستگاه سی تی اسکن برای عضوی مانند سر، برابر  $0.33$  میلی‌سیورت است. با توجه به تراکم بیشتر نمونه‌های بتنی و همچنین دوز ارسالی توسط دستگاه بازرسی بار ( $0.008$  میلی‌سیورت) می‌توان عدم نمایش عیوب با وضوح بالا در تصاویر را توجیه کرد. بر همین اساس می‌توان نتیجه گرفت با استفاده از تجهیزات پیشرفته‌تر، نتایج مطلوب‌تری به دست خواهد آمد.

#### تشکر و قدردانی

از همکاری مدیریت فرودگاه بین‌المللی مهرآباد به جهت در اختیار قراردادن تجهیزات مورد نیاز و همچنین همراهی مسئولان بخش فنی و مهندسی و حراست فرودگاه به جهت انجام هر چه بهتر آزمایش‌ها و نیز از پژوهشگاه بین‌المللی مهندسی زلزله و زلزله‌شناسی برای حمایت‌های مالی صورت‌گرفته، تشکر و قدردانی می‌شود.

#### منابع - References

1. Qasrawi, H.Y., 2000. Concrete strength by combined nondestructive methods simply and reliably predicted. *Cement and Concrete Research*, 30(5), pp.739-746. Available at: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00226-X](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00226-X).
2. Libretexts, 2016. 6.4: The Compton Effect by OpenStax is licensed CC BY, except where otherwise noted. *Libretexts*. Available at:

در شکل ۱۲، نیز نمونه‌ی استوانه‌یی دوم، پس از تصویربرداری مشاهده می‌شود؛ که دچار ترک خوردگی و شکستگی در ناحیه‌ی بتنی شده است، ولی در ناحیه‌ی اتصال کوپلر دچار مشکلی نشده است. با توجه به مطالب بیان شده در شکل مذکور، وجود ناحیه‌یی از بتن که دچار ترک خوردگی و شکستگی شده است، باعث تغییر چگالی ماده در آن ناحیه شده است؛ بنابراین، در اثر عیوب ذکر شده و کاهش چگالی، نواحی اشاره شده با رنگی روشن‌تر نسبت به سایر نواحی مشاهده می‌شوند.

#### ۲.۵. نمونه‌های چوبی

در نمونه‌های چوبی نیز وجود عیوبی، مانند: گره، پوسیدگی، و ترک باعث کاهش مقاومت و استحکام می‌شود و در مقاطع چوبی، همانند مقاطع بتنی، وجود ترک باعث کاهش چگالی و در نتیجه، مشاهده‌ی نواحی ذکر شده با رنگ روشن‌تر می‌شود. در دو شکل ۱۳ و ۱۴، می‌توان نتایج حاصل از بازرسی دو نمونه‌ی چوبی را مشاهده کرد.

در شکل ۱۳، در قسمت پایینی نمونه ترک مشاهده می‌شود؛ که با توجه به تفاوت رنگ و روشن‌تر بودن قسمت ترک با سایر نواحی، قابل تشخیص است. همچنین در قسمت‌های مرکزی شکل اخیر، نواحی با طیف رنگی تیره‌تر، نشانگر وجود گره در آن محل است.

در شکل ۱۴، نیز یک ترک سراسری در طول نمونه مشاهده می‌شود؛ که در آن قسمت از نمونه، تراکم و چگالی چوب نسبت به سایر نواحی در طول نمونه متفاوت، تیره‌تر، و قابل تشخیص هستند. در نواحی مذکور ممکن است گره وجود داشته باشد و یا تراکم چوب در آنجا بیشتر از سایر نواحی باشد. برای تشخیص بهتر موارد اشاره شده، بهتر است نمونه دست‌کم در دو جهت متفاوت بازرسی شود.

#### ۶. نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج به دست آمده از کنترل نمونه‌ها و همچنین توان دستگاه بازرسی فرودگاه می‌توان امیدوار بود که با استفاده از تجهیزات و دستگاه‌های پیشرفته‌تر، مانند دستگاه سی تی اسکن و یا میکرو سی تی، نتایج دقیق‌تر و قابل قبول‌تری به دست آید. ولی به‌طور کلی می‌توان به این موارد اشاره کرد:

۱. با توجه به نتایج به دست آمده برای بررسی دقیق نمونه‌ها با ضخامت زیاد، دست‌کم تصویربرداری از دو جهت لازم است.
۲. با توجه به اینکه هر چه ضخامت نمونه بیشتر باشد، میزان ضریب تضعیف افزایش می‌یابد و در نتیجه سبب کاهش شدت اشعه‌ی ایکس عبوری می‌شود، که با افزایش زمان تابش می‌توان این مورد را کنترل کرد.

<https://phys.libretexts.org> (Accessed: 13 September 2022).

3. Compton, A.H., 1923. A quantum theory of the scattering of X-rays by light elements. *Physical Review*, 21(5), pp.483. Available at: <https://doi.org/10.1103/PhysRev.21.483>.
4. Caliskan, S., 2007. Examining Concrete Cores by Nondestructive Techniques. In: *4th Middle East NDT*

- Conference and Exhibition*. Citeseer. Available at: <https://www.ndt.net/?id=5657>.
5. Balázs, G.L., Lublőy, É. and Földes, T., 2018. Evaluation of concrete elements with X-ray computed tomography. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(9), p.06018010. Available at: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002389](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002389).
  6. Suzuki, T., Shiotani, T. and Ohtsu, M., 2017. Evaluation of cracking damage in freeze-thawed concrete using acoustic emission and X-ray CT image. *Construction and Building Materials*, 136, pp.619-626. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.013>.
  7. Wei, Q., Leblon, B. and La Rocque, A., 2011. On the use of X-ray computed tomography for determining wood properties: a review. *Canadian Journal of Forest Research*, 41(11), pp.2120-2140. Available at: <https://doi.org/10.1139/x11-111>.
  8. Xi, X. and Yang, S., 2019. Investigating the spatial development of corrosion of corner-located steel bar in concrete by X-ray computed tomography. *Construction and Building Materials*, 221, pp.177-189. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.023>.
  9. Vicente, M.A., Mínguez, J. and González, D.C., 2019. Computed tomography scanning of the internal microstructure, crack mechanisms, and structural behavior of fiber-reinforced concrete under static and cyclic bending tests. *International Journal of Fatigue*, 121, pp.9-19. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2018.11.023>.
  10. Han, J., 2013. Monitoring the evolution of accelerated carbonation of hardened cement pastes by X-ray computed tomography. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25(3), pp.347-354. Available at: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000610](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000610).
  11. Poinard, C., 2012. Compression triaxial behavior of concrete: the role of the mesostructure by analysis of X-ray tomographic images. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 16(sup1), pp.s115-s136. Available at: <https://doi.org/10.1080/19648189.2012.682458>.
  12. Rossi, E., 2020. The influence of defects at the steel/concrete interface for chloride-induced pitting corrosion of naturally-deteriorated 20-years-old specimens studied through X-ray Computed Tomography. *Construction and Building Materials*, 235, p.117474. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117474>.
  13. Siryabe, E., 2020. X-ray digital detector array radiology to infer sagging depths in welded assemblies. *NDT & E International*, 111, p.102238. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2020.102238>.
  14. ÇALIGÜLÜ, U., 2016. X-ray radiography of AISI 4340-2205 steels welded by friction welding. *Materiali in Tehnologije*, 50(1). Available at: <https://doi.org/10.17222/mit.2014.211>.
  15. Yenumula, L., 2019. Radiographic evaluation of gas tungsten arc welded joints used in nuclear applications by X-and gamma-rays. *NDT & E International*, 102, pp.144-152. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2018.11.017>.
  16. Souza, M., 2009. Detection of lack of fusion weld defects by radiography. In: *AIP Conference Proceedings*. American Institute of Physics. Available at: <https://doi.org/10.1063/1.3114088>.
  17. Didžiokas, R., Januteniene, J. and Jonaityte, J., 2008. The impact of the internal welding defects on the joint strength. *Transport*, 23(3), pp.240-244. Available at: <https://doi.org/10.3846/1648-4142.2008.23.240-244>.
  18. Türkmen, M., 2019. X-Ray Radiography of Microalloyed Steel Joined by Submerged Arc Welding. *Sakarya University Journal of Science*, 23(5), pp.896-901. Available at: <https://doi.org/10.16984/saufenbilder.546992>.
  19. Deepak, J., 2021. Non-destructive testing (NDT) techniques for low carbon steel welded joints: A review and experimental study. *Materials Today: Proceedings*, 44, pp.3732-3737. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.578>.
  20. Yamada, T., 2012. In-situ X-ray Observation of Molten Pool Depth during Laser Micro Welding. *Journal of Laser Micro/Nanoengineering*, 7(3). Available at: <https://doi.org/10.2961/jlmn.2012.03.0002>.
  21. Stritt, P., 2016. Comprehensive process monitoring for laser welding process optimization. In: *High-Power Laser Materials Processing: Lasers, Beam Delivery, Diagnostics, and Applications V*. SPIE. Available at: <https://doi.org/10.1117/12.2212814>.
  22. Bernachy-Barbe, F., 2020. Using X-ray microtomography to study the initiation of chloride-induced reinforcement corrosion in cracked concrete. *Construction and Building Materials*, 259, p.119574. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119574>.
  23. Michel, A., 2011. Monitoring reinforcement corrosion and corrosion-induced cracking using non-destructive x-ray attenuation measurements. *Cement and Concrete Research*, 41(11), pp.1085-1094. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.06.006>.



24. Dong, B., 2017. Monitoring reinforcement corrosion and corrosion-induced cracking by X-ray microcomputed tomography method. *Cement and Concrete Research*, 100, pp.311-321. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.07.009>.
25. McGovern, M., 2010. Detection and assessment of wood decay using X-ray computer tomography. In: *Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2010*. SPIE. Available at: <https://doi.org/10.1117/12.843709>.
26. Van den Bulcke, J., 2009. Three-dimensional X-ray imaging and analysis of fungi on and in wood. *Microscopy and Microanalysis*, 15(5), pp.395-402. Available at: <https://doi.org/10.1017/S1431927609990419>.
27. Salim, K., 2014. Characterization of Algerians oak wood by x-ray tomographic scanner and free software image-J. *Wood Research*, 59(2), pp.335-342. Available at: <https://hal.science/hal-01195079>.
28. Riggio, M., 2014. In situ assessment of structural timber using non-destructive techniques. *Materials and Structures*, 47(5), pp.749-766. Available at: <https://doi.org/10.1617/s11527-013-0093-6>.
29. Chubinskii, A., 2014. Physical nondestructive methods for the testing and evaluation of the structure of wood-based materials. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 50(11), pp.693-700. Available at: <https://doi.org/10.1134/S1061830914110023>.
30. Ge, Z., 2018. The detection of structure in wood by X-ray CT imaging technique. *BioResources*, 13(2), pp.3674-3685. Available at: <https://doi.org/10.15376/biores.13.2.3674-3685>.
31. Koddenberg, T., Zauner, M. and Militz, H., 2020. Three-dimensional exploration of soft-rot decayed conifer and angiosperm wood by X-ray micro-computed tomography. *Micron*, 134, p.102875. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.micron.2020.102875>.
32. Grabner, M., Salaberger, D. and Okochi, T., 2009. The need of high resolution  $\mu$ -X-ray CT in dendrochronology and in wood identification. In: *2009 Proceedings of 6th International Symposium on Image and Signal Processing and Analysis*. IEEE. Available at: <https://doi.org/10.1109/ISPA.2009.5297695>.
33. Parracha, J., et al., 2021. Assessment of the density loss in anobiid infested pine using X-ray micro-computed tomography. *Buildings*, 11(4), p.173. Available at: <https://doi.org/10.3390/buildings11040173>.
34. Lister, P., 2004. Applications of x-ray computed tomography in the wood products industry. In: *16th WCNDT 2004-World Conference on NDT*. Available at: <https://www.ndt.net/?id=2464>.
35. Halmshaw, R., 1995. *Industrial radiology: theory and practice*. Vol. 1. Springer Science & Business Media. Available at: <https://books.google.com>.
36. Vicente, M.A., Mínguez, J. and González, D.C., 2017. The use of computed tomography to explore the microstructure of materials in civil engineering: from rocks to concrete. In: *Computed tomography - advanced applications*, pp.207-230. Available at: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00226-X](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00226-X).
37. Sadra, H., Deevband, M.R. and Sardary, D., 2015. Estimated organ and effective dose from CT examinations using software impact at Shahid Beheshti University of Medical Sciences hospitals. *Research in Medicine*, 39(1), pp.26-29. [In Persian]. Available at: [http://pejouhesh.sbmu.ac.ir/files/site1/user\\_files\\_ec23de/sadra-A-10-864-1-6d02ab1.pdf](http://pejouhesh.sbmu.ac.ir/files/site1/user_files_ec23de/sadra-A-10-864-1-6d02ab1.pdf).