

کنترل سلامت اعضای سازه‌ای به روش توموگرافی اشعه ایکس

سید سجاد کمالی^۱، دکتر فریبرز ناطقی الهی^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی زلزله، پژوهشکده مهندسی سازه، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله

۲- استاد، پژوهشکده مهندسی سازه، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله (نویسنده مسئول)

پست الکترونیکی نویسندگان:

۱- ss.kamali@stu.iiees.ac.ir

۲- nateghi@iiees.ac.ir

چکیده:

در این مقاله به بررسی کارایی توموگرافی کامپیوتری اشعه ایکس در بازرسی سازه‌های شهری و سازه‌های ساختمانی پرداخته می‌شود. توموگرافی اشعه ایکس یک روش غیرمخرب براساس جذب اشعه ایکس می‌باشد که کاربرد فراوانی در زمینه پزشکی دارد. با استفاده از این روش می‌توان به مطالعه و بررسی ساختار داخلی سازه‌های قدیمی در جهت رفع عیوب و حفظ ایمنی ساکنین و همچنین نگهداری هرچه بهتر آنها پرداخت. به طور مثال سازه‌های شهری مانند تیرهای برق، علائم راهنمایی و رانندگی که در اثر مخاطرات طبیعی و یا فرسودگی به طور سالانه، باعث وقوع خسارات مالی و یا حتی جانی می‌شوند. از ویژگی‌های این روش می‌توان به دقت و سرعت بالای آن در بررسی عضو اشاره نمود. با توجه به قابلیت‌های این روش، در این پژوهش با استفاده از یک دستگاه بازرسی چمدان در محل فرودگاه مهرآباد، به بررسی تعدادی نمونه بتنی و چوبی جهت شناسایی عیوبی مانند ترک، حفرات و یا گره در نمونه‌های چوبی پرداخته شد. نتایج بررسی ارتباط مستقیمی با توان دستگاه و مدت تابش اشعه به نمونه دارد. با توجه به نتایج می‌توان عیوبی مانند ترک در بتن و یا گره در چوب را مشاهده نمود.

واژگان کلیدی:

غیر مخرب، اشعه ایکس، توموگرافی کامپیوتری، زلزله، مخرب، سازه، عیوب سازه‌ای

Health monitoring of structural elements using CT-Xray

Abstract

Structural health monitoring is becoming more reliable as technology advances. There are many structures which are in use throughout cities and environments that requires constant attention due to fatigue of corrosion and environmental effects such as floods, earthquakes, or strong winds. This means that by advent of new damage detection technique, authorities can make sure that these vital structural elements such as road signs or traffic lights and so on are safe.

The important key to these techniques is that they must be simple and relatively inexpensive. Therefore an attempt was done to use techniques in medical practice and adapt those to structural members.

In this article, the effectiveness of X-ray computed tomography in the inspection of urban structures and building structures is discussed. X-ray tomography is a non-destructive method based on X-ray absorption, which is widely used in the medical field. By using this method, it is possible to study and examine the internal structure of old structures in order to fix defects and maintain the safety of residents, as well as to maintain them as best as possible. For example, urban structures such as electric poles, traffic signs, which cause financial losses or even lives due to natural hazards or wear and tear every year. One of the features

of this method is its high accuracy and speed in checking the member. Considering the capabilities of this method, in this research, using a baggage inspection device at the MehrAbad airport, a number of concrete and wooden samples were examined to identify defects such as cracks, holes, or knots in wooden samples. The results of the investigation are directly related to the power of the device and the duration of radiation to the sample. According to the results, defects such as cracks in concrete or knots in wood can be observed.

Keywords: Non-destructive, X-ray, computed tomography, earthquake, destructive, structure, structural defects

پایان کارشناسی ارشد

۱- مقدمه و تاریخچه تحقیقات

بتن و فولاد از پرکاربردترین مصالح مورد استفاده در صنعت عمران می‌باشند که در سازه‌های مختلفی مانند ساختمان‌ها، پل‌ها، سازه‌های شهری و ... به کار گرفته می‌شوند. به طور کلی سازه‌ها دارای عمر مفیدی می‌باشند که در این مدت و پس از آن، نیازمند بررسی‌هایی جهت حفظ کارایی خود هستند. علاوه بر این، سازه‌ها ممکن است در این مدت تحت اثر مخاطرات طبیعی مانند سیل و زلزله قرار بگیرند و در اثر این مخاطرات وقوع خسارت در سازه‌ها محتمل می‌باشد. از جمله این خسارات می‌توان به زنگ زدگی فولاد، ایجاد ترک در بتن، شکست جوش و ... اشاره نمود. به عنوان مثال سازه‌های شهری مانند تیرهای برق و یا علائم راهنمایی و رانندگی که به طور 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 خسارات جانی و مالی می‌باشد. و یا درختان قدیمی، که در اثر باد و باران و به علت پوسیدگی داخلی دچار شکستگی می‌شوند و اغلب با افتادن بر روی معابر و یا ماشین‌ها باعث خساراتی می‌شوند. در شکل ۱ می‌توان نمونه‌ای از این اتفاق را مشاهده نمود که در اثر وزش باد، یک تابلو مسیرنا سقوط کرده است.



شکل ۱: نمایی از سقوط تابلو مسیرنا در اثر وزش باد

برای شناسایی این عیوب روش‌های متفاوتی وجود دارد که به طور کلی آنها را میتوان به دو دسته مخرب و غیرمخرب تقسیم نمود. روش‌های مخرب شامل روش‌هایی هستند که نیازمند نمونه‌گیری و

کرگیری از سازه هستند و به همین دلیل این روش‌ها زمان بر بوده و احتمال ایجاد آسیب بیشتر به سازه در این روش 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 سازه مورد نظر را مورد بررسی قرار داد و در جهت رفع عیوب احتمالی اقدام نمود. یکی از روش‌های غیرمخرب، که امروزه کارایی آن مورد بحث قرار گرفته است، استفاده از توموگرافی کامپیوتری اشعه ایکس جهت شناسایی عیوب داخلی سازه‌ها می‌باشد. بنابر نظر لیچنسکی^[۱] روش‌های غیرمخرب نسبت به روش‌های مخرب دارای مزایای زیر میباشد:

- 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 نمود.
- ۶- هزینه کمتر تجهیزات و آزمایش

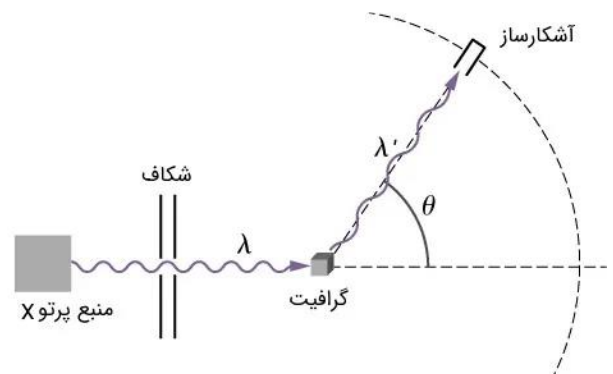
با توجه به دلایل ذکر شده ما نیازمند روش‌هایی هستیم که با استفاده از آنها بتوانیم دید مناسبی از داخل مقطع مورد نظر داشته باشیم و در جهت رفع عیوب احتمالی اقدامات لازم را انجام دهیم. هدف از انجام این پروژه بررسی کارایی توموگرافی کامپیوتری اشعه ایکس در زمینه کنترل و بازرسی اعضا سازه‌ای به صورت غیرمخرب می‌باشد. توموگرافی کامپیوتری به معنای نمایش یک برش از یک جسم به صورت کامپیوتری است، به این معنا که، در این روش 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 اشعه ایکس قبل و بعد از عبور از مقطع مورد نظر و در نتیجه تفاوت رنگ در تصویر بدست آمده می‌شود پراکندگی کامپتون^۱ نام دارد.

^۱ compton scattering

۱-۱- پراکندگی کامپتون

پراکندگی کامپتون عنوانی است که به از دست رفتن انرژی پرتوهای ایکس در نتیجه برخورد به یک ماده گفته می‌شود. طبق فیزیک کلاسیک هنگامی که یک موج الکترومغناطیسی به اتم‌های ماده برخورد کند طول موج پرتو نوری پخش شده باید برابر با طول موج فرودی باشد. بر خلاف این پیش‌بینی صورت گرفته توسط فیزیک کلاسیک، مشاهدات نشان می‌دهند که در هنگام برخورد موجی با طول موج مشخص به ماده‌ای، پرتوهای منحرف شده طول موجی متفاوت نسبت به طول موج ورودی دارند.

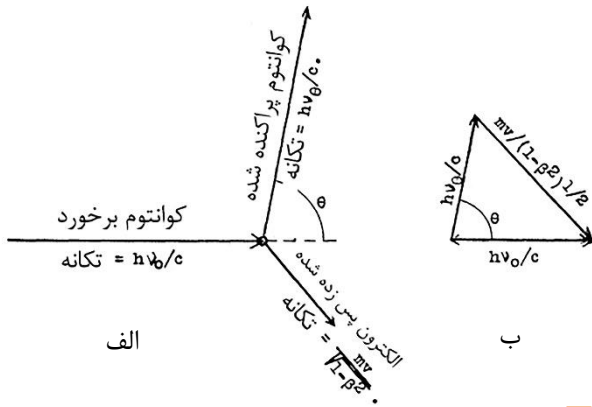
در شکل ۲ شماتیک آزمایش وقوع پراکندگی کامپتون ترسیم شده است. همان‌طور که در این شکل نیز نشان داده شده، نحوه انجام آزمایش بسیار ساده است. در حقیقت در ابتدا امواج X با طول موج λ به الکترون‌های نمونه‌ای برخورد داده می‌شوند. در نتیجه این امواج با اتم‌های نمونه برهمکنش نشان می‌دهد و امواجی با طول موج جدید λ' منحرف شده و اندازه طول موج توسط یک آشکارساز معلوم می‌شود. همان‌طور که در شکل قابل مشاهده است، طول موج پرتو اشعه ایکس پس از برخورد با نمونه افزایش یافته است و این مورد بدین معنی می‌باشد که پرتوهای اشعه 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.



شکل ۲: شماتیک وقوع پراکندگی کامپتون [۲]

بر اساس نظریه فیزیک کوانتومی، هر فوتون از اشعه ایکس دارای تکانه فرودی $\frac{hv}{c}$ می‌باشد که در آن، h ثابت پلانک، v فرکانس

اشعه و c سرعت نور است، که توسط الکترونی به جرم m پراکنده می‌شود [۳]. پس از برخورد تکانه خروجی برابر $\frac{hv_{\theta}}{c}$ می‌باشد. با توجه به شکل ۳ (الف و ب) اشعه پراکنده شده نسبت به اشعه اولیه زاویه θ خواهد داشت.



شکل ۳ (الف و ب): نمایی از تکانه ورودی و خروجی [۳]
با توجه به این شکل می‌توان رابطه ۱ [۳] را اثبات کرد که:

(۱)

$$\left(\frac{m\beta c}{\sqrt{1-\beta^2}}\right)^2 = \left(\frac{hv_0}{c}\right)^2 + \left(\frac{hv_{\theta}}{c}\right)^2 + 2\frac{hv_0}{c} \cdot \frac{hv_{\theta}}{c} \cos \theta$$

که در آن β برابر نسبت سرعت پس زدن الکترون به سرعت نور است. در ادامه می‌توان با توجه به رابطه ۲ [۳] نتیجه گرفت که انرژی فوتون پراکنده شده نسبت به انرژی فوتون فرودی کمتر می‌باشد:

$$hv_{\theta} = hv_0 - mc^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} - 1\right) \quad (۲)$$

با توجه به روابط ۱ و ۲ می‌توان به رابطه ۳ [۳] رسید:

$$v_{\theta} = \frac{v_0}{1 + \alpha \sin^2 \frac{\theta}{2}} \quad (۳)$$

که در آن α برابر [۳]:

$$\alpha = \frac{hv_0}{mc^2} = \frac{h}{mcl} \quad (۴)$$

با توجه به رابطه ۳ و ۴ می‌توان نتیجه گرفت که طول موج اشعه خروجی از الکترون بیشتر از طول موج ورودی می‌باشد [۳]:

$$\lambda_{\theta} = \lambda_0 + \left(\frac{h}{mc}\right) \sin^2 \frac{\theta}{2} \quad (۵)$$

پس از جذب اشعه ایکس عبوری از هر قسمت از جسم مورد نظر، پارامترهای توموگرافی کامپیوتری اشعه ایکس بر اساس اعدادی کمی سازی می‌شوند که این اعداد در واحد هانسفیلد^۲ بدست می‌آیند. این

^۲ HU

اعداد نشان دهنده میانگین جذب اشعه ایکس مربوط به هر ناحیه یا توجه به خواص مواد، در آن ناحیه می‌باشند. به طور مثال این عدد برای آب برابر ۰ و برای هوا ۱۰۰۰- می‌باشد و بیشترین مقدار آن برابر ۳۰۰۰ می‌باشد. سپس تصاویر در مقیاس خاکستری بدست می‌آیند که نواحی با مقدار هانسفیلد پایین تاریک‌تر و نواحی با مقدار هانسفیلد بالاتر روشن‌تر نمایش داده می‌شوند.

هدف از این مقاله بررسی کارایی این روش 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 می‌باشد. در زمینه بررسی عیوب بتن و فولاد مطالعاتی صورت گرفته است. کالیسکان [۴] تاثیر مکان را بر روی تخلخل و مقاومت و تفاوت ساختار داخلی هسته‌های بتنی را مورد بررسی قرار داد و با استفاده از توموگرافی اشعه ایکس مشخص شد میزان تخلخل در نواحی پایینی کمتر از نواحی بالایی یک ستون بتنی بوده و میزان تراکم بیشتر می‌باشد. بالاز و همکاران [۵] به بررسی تغییرات مقدار هانسفیلد در اثر تماس با آتش و زوال ناشی از خوردگی آرماتورها در مقاطع بتن مسلح پرداختند. سوزوکی و همکاران [۶] به بررسی توزیع ترک در یک دیوار بتن مسلح ناشی از فرآیند ذوب و انجماد پرداختند. تیان و همکاران [۷] گسترش ترک در نمونه‌های بتنی راه تحت بار فشاری تک محوری مورد بررسی قرار دادند. شی و همکاران [۸] خوردگی آرماتورها در گوشه مقاطع بتن مسلح را مورد بررسی قرار دادند. ویسنته و همکاران [۹] نوع آسیب ایجاد شده در مقاطع بتنی تقویت شده با فیبر را مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش مشخص شد کمتر از ۲۰ درصد آسیب‌ها ناشی از شکستگی فیبرها و بیشتر از ۸۰ درصد آسیب‌ها ناشی از جدایش در بتن می‌باشد و همچنین وجود حفرات در بتن، وقوع ترک‌های اولیه را تسهیل می‌نماید. هان و همکاران [۱۰] تاثیر کربناته شدن بتن بر روی ایجاد ترک در آن را مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش مشخص شد که با افزایش عمق کربناته شدن میزان تخلخل در نمونه به علت پر شدن منافذ با کربنات کلسیم و آب تولید شده در اثر واکنش‌های کربناته شدن به شدت کاهش می‌یابد. همچنین توزیع ترک‌ها در امتداد جهت کربناته شدن به دلیل انقباض ناشی از این واکنش می‌باشد و با افزایش زمان

کربناته شدن، حجم و سطح ترک‌ها بزرگتر می‌شود. پوپنارد و همکاران [۱۱] آسیب‌های مزوساختاری، در اثر آزمایش سه محوری در بتن را مورد بررسی قرار دادند. روسی و همکاران [۱۲] خوردگی آرماتورهای یک مقطع بتن مسلح ۲۰ ساله را مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند که میزان خوردگی در نواحی کناری و مناطقی که ترک وجود دارد بیشتر می‌باشد. سیریابه و همکاران [۱۳] اعماق افتادگی جوش در مقاطع جوش داده شده را مورد بررسی قرار دادند. یوگار و همکاران [۱۴] مقاطع جوش داده شده با جوش اصطکاکی را مورد بررسی قرار دادند. ینومولا و همکاران [۱۵] به بررسی اتصالات یک مخزن انبساط استوانه‌ای که با استفاده از روش قوس تنگستن جوشکاری شده است، پرداختند. در این بررسی عیوبی مانند آخال تنگستن و عدم وجود خطوط همجوشی^۳ قابل مشاهده می‌باشد. سوزا و همکاران [۱۶] عدم همجوشی در جوش لوله‌های فولادی را مورد بررسی قرار دادند. دیدژیوکاس و همکاران [۱۷] در پژوهشی به شناسایی عیوبی مانند نفوذ سرباره، ناپیوستگی جوش و حفره‌های گاز در مقاطع جوش داده شده پرداختند. ترکمن و همکاران [۱۸] در پژوهشی به بررسی رایج‌ترین عیوب جوش پرداختند که در انتها مشخص شد رایج‌ترین عیب موجود در مقاطع جوش داده شده، عدم نفوذ جوش می‌باشد. دیپاک و همکاران [۱۹] به بررسی جوش‌های قوس فلزی با گاز محافظ^۴، قوسی تنگستن گازی و جوشکاری با پرتو لیزری^۵ پرداختند. پس از بررسی مشخص شد جوشکاری با پرتو لیزری نسبت به دو روش دیگر بدون عیب بوده است. یامادا و همکاران [۲۰] به بررسی اتصالات جوش داده شده در حین جوشکاری لیزری پرداختند. در این پژوهش عیوبی مانند ترک در جوش و وجود حباب بررسی شد و همچنین به دلیل تفاوت چگالی بین فاز مایع و جامد فولاد، امکان مشاهده خطوط همجوشی وجود دارد. استریت و همکاران [۲۱] به بررسی کیفیت، شکل و عمق جوشکاری لیزری پرداختند. برناچی و همکاران [۲۲] وقوع خوردگی آرماتورها به علت وجود ترک در مقاطع بتن مسلح را مورد بررسی قرار دادند.

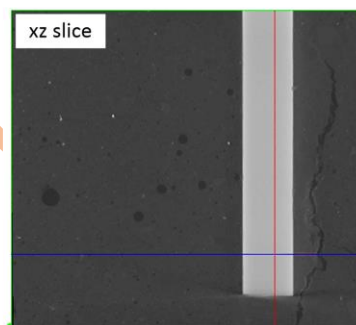
میچل و همکاران [۲۳] به بررسی ترک خوردگی مقاطع بتن مسلح ناشی از خوردگی تسریع شده آرماتورها پرداختند. دانگ و همکاران

^۵ LBW (Laser beam welding)

^۳ LOF (lack of fusion lines)

^۴ GMAW (Gas Metal Arc Welding)

[۲۴] به بررسی خوردگی تسریع شده آرماتورها در نمونه بتن مسلح و آسیب‌های ناشی از آن در پوشش نمونه پرداختند. در شکل ۴ [۸] می‌توان نمونه‌ای از نتایج حاصل شده را مشاهده نمود. در این شکل به خوبی وجود ترک و حفرات قابل شناسایی می‌باشد. این نمونه به وسیله دستگاه سی تی اسکن مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل ۴: نمایی از ترک، حفرات و آرماتور [۸]

علاوه بر بتن و فولاد، چوب نیز از مصالحی می‌باشد که در گذشته کاربرد فراوانی داشته و اکنون نیز از آن در مواردی استفاده می‌شود. بازرسی و مقاوم سازی سازه‌های چوبی و یا آثار باستانی چوبی از اهمیت فراوانی در حفظ و نگهداری آنها برخوردار است. به طور کلی سازه‌های چوبی در معرض پوسیدگی و مستعد تخریب قارچی و همچنین ترک خوردگی می‌باشند. روش‌هایی جهت جلوگیری از وقوع فرآیند پوسیدگی در چوب وجود دارد، با این حال این روش‌ها تنها این فرآیند را به تاخیر انداخته‌اند. فرآیند پوسیدگی باعث کاهش استحکام و مقاومت در چوب و در نتیجه باعث خسارات زیادی می‌شود. بنابراین بازرسی و انجام اقدامات مورد نیاز در جهت حفظ و نگهداری این سازه‌ها و یا آثار ضروری می‌باشد.

مانند بتن و فولاد، میتوان به راحتی با استفاده از روش توموگرافی اشعه ایکس، سازه‌های چوبی را مورد بررسی قرار داد. به جز پوسیدگی و تخریب قارچی که در دراز مدت در چوب صورت می‌گیرد، در چوب‌ها عیوب دیگری مانند وجود گره و یا ترک نیز دارند که شناسایی آنها در حفظ سلامت چوب حائز اهمیت می‌باشد. در این زمینه فعالیتهای صورت گرفته است که در ادامه به تعدادی از آنها اشاره می‌شود. مک‌گاورن و همکاران [۲۵] پوسیدگی نمونه‌های چوبی

در اثر قرارگیری در محیط قارچی را مورد بررسی قرار دادند. بالک و همکاران [۲۶] به بررسی پوسیدگی مقاطع چوبی پرداختند. سلیم و همکاران [۲۷] میزان تراکم چوب در سه ناحیه مختلف از درختان را بررسی نمودند. ریگیو و همکاران [۲۸] مشکلات داخلی سازه چوبی کلیسای سنت آنه^۶ را مورد بررسی قرار دادند. چونسکی و همکاران [۲۹] در پژوهشی به بررسی ساختار داخلی و عیوبی مانند گره‌ها که بر استحکام مقاطع چوبی تاثیرگذر است پرداختند. ژیدانگ و همکاران [۳۰] به بررسی عیوب نمونه‌های چوبی چند لایه شامل عیوبی مانند گره، ترک و همچنین ساختار داخلی آنها مانند حلقه‌های داخلی پرداختند. کودنبرگ و همکاران [۳۱] پوسیدگی ناشی از قارچ‌زدگی را مورد بررسی قرار دادند. گربرنر و همکاران [۳۲] با استفاده از روش میکرو توموگرافی اشعه ایکس به بررسی یک کلبه چوبی پرداختند. پاراچا و همکاران [۳۳] به بازرسی مقاطع چوبی که مورد حمله آنوبیید^۷ (نوعی حشره) قرار گرفته‌اند پرداختند. در پژوهشی که توسط شرکت فورینتک کانادا^۸ [۳۴] انجام شد به بررسی عیوب داخلی چوب و همچنین میزان تراکم چوب پرداخته شد.

۲- پردازش اشعه ایکس

پس از تابش اشعه ایکس به وسیله تیوب اشعه ایکس تولید می‌شود، با برخورد اشعه تولید شده به جسم مورد نظر، اشعه اولیه مقداری از انرژی اولیه خود را از دست می‌دهد. مطابق با قانون بیرلامبرت شدت اشعه ایکسی که از یک جسم عبور می‌کند مطابق با رابطه (۶) [۳۵] زیر محاسبه می‌شود:

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

که در آن I = شدت اشعه ایکس پس از عبور از جسم، I_0 = شدت اشعه ایکس قبل از جسم، μ = ضریب تضعیف خطی در طول نمونه می‌باشد. ضریب تضعیف، در هر نقطه‌ای از جسم که از آن عبور می‌کند به چگالی (ρ) آن نقطه بستگی دارد. نسبت $\frac{\mu}{\rho}$ تقریباً با Z^3 متناسب می‌باشد که Z برابر با عدد اتمی عنصر می‌باشد [۳۶].

با توجه به رابطه بیان شده میتوان علت تفاوت رنگ در نواحی مختلف یک جسم را توجیه نمود. به طور مثال در یک نمونه بتن مسلح در تصاویر سیاه و سفید، بخش‌های بتنی به رنگ سیاه نمایش داده

^۸ Forintek Canada Corp

^۶ Saint Anne's Church

^۷ Anobiid



شکل ۵: نمونه بتن مسلح استوانه‌ای



شکل ۶: نمونه‌های چوب

می‌شود و بخش‌های فلزی به رنگ سفید نمایش داده می‌شود زیرا فلز تمام اشعه را جذب خود نموده و میزان انرژی عبوری به صفر می‌رسد به همین علت در این نواحی تصاویر بدست آمده به وسیله آشکارساز به صورت سفید نمایش داده می‌شود. البته قابل ذکر می‌باشد اگر عیوبی در نواحی فلزی وجود داشته باشد مانند خوردگی آرماتور، قابل تشخیص می‌باشد.

۳- نمونه‌ها

با توجه به مطالب بیان شده، در این پژوهش به منظور بررسی کارایی اشعه ایکس در شناسایی عیوب سازه‌ای، از تعدادی نمونه آزمایشگاهی بتن مسلح و چوبی استفاده شد. نمونه‌های بتن مسلح شامل دو نمونه استوانه‌ای با ارتفاع ۵۴ و قطر ۱۵ سانتی‌متر، که در مرکز هر کدام از آنها دو آرماتور با قطر ۱۴ میلی‌متر به وسیله کوپلر (وصله مکانیکی) به یکدیگر متصل شده‌اند و یک نمونه بتن مسلح مستطیلی که در آن دو آرماتور به قطر ۸ و ۴ میلی‌متر قرار گرفته است، می‌شود. همچنین نمونه‌های چوبی در این پژوهش شامل دو عدد چوب چهار تراش که ابعاد هر کدام ۵۷*۵*۸ سانتی‌متر می‌باشد، می‌شود. مشخصات نمونه‌ها در جدول شماره ۱ و نمایی از آنها در شکل‌های ۵ و ۶ مشخص می‌باشد.

جدول ۱: مشخصات نمونه‌ها

نوع نمونه	ابعاد	مشخصات
بتن مسلح مستطیلی	آرماتور با قطر ۸ و ۴ میلی‌متر	سیمان پرتلند نوع ۲
دو نمونه بتن مسلح استوانه‌ای	ارتفاع ۵۴ و قطر ۱۵ سانتی‌متر، آرماتور با قطر ۱۴ میلی‌متر	سیمان پرتلند نوع ۲
چوب چهار تراش ۱	با ابعاد ۵۷*۵*۸ سانتی‌متر	از چوب درخت گردو
چوب چهار تراش ۲	با ابعاد ۵۰*۸*۸ سانتی‌متر	از چوب درخت گردو

۴- مشخصات و نحوه عملکرد دستگاه اشعه ایکس (بازرسی بار)

این پژوهش با همکاری فرودگاه بین‌المللی مهرآباد، با استفاده از دستگاه بازرسی بار چمدان صورت گرفت. دستگاه ساخت شرکت سمیتز دتکشن^۹ می‌باشد که مشخصات آن در جدول ۲ آورده شده است. همچنین در شکل ۷ و ۸ و ۹ نمونه‌ای از این دستگاه و نحوه نمایش تصویر قابل مشاهده می‌باشد.

^۹ smiths detection

جدول ۲: مشخصات فنی دستگاه بازرسی بار چمدان

مشخصات فنی دستگاه بازرسی بار چمدان	
ابعاد	طول ۳۵۸، ارتفاع ۱۸۴، عرض ۱۲۹ سانتی‌متر، ابعاد تونل ۹۱*۷۷ سانتی‌متر
توان	۱۶۰ کیلوولت
دوز اشعه ایکس ارسالی	۰.۰۰۰۸ میلی سیورت



شکل ۸: نمایی از دستگاه بازرسی بار



شکل ۹: نحوه نمایش تصویر در دستگاه بازرسی بار

۵- نتایج بازرسی

در تصاویر حاصل از توموگرافی کامپیوتری اشعه ایکس، تفاوت رنگ در نواحی مختلف جسم موردنظر نشان دهنده نرخ جذب اشعه و همچنین ضریب تضعیف μ می‌باشد و همانطور که بیان شد این

بر اساس میزان تشعشعی که از چمدان عبور کرده است، یک تصویر نزدیک به زمان واقعی از اقلام ایجاد می‌کند. مواد آلی مانند چوب، آب، پلاستیک و 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 متراکم تر باشد یا لایه ماده در مسیر اشعه ایکس ضخیم‌تر باشد، آیتم تیره‌تر روی صفحه کامپیوتر ظاهر می‌شود. موادی که بیش از حد متراکم هستند که تابش نمی‌تواند از آن عبور کند سیاه به نظر می‌رسد.

لازم به ذکر است در پژوهشی که توسط صدرا و همکاران [۳۷] صورت گرفت، میزان دوز موثر اشعه ایکس ارسالی توسط دستگاه سی تی اسکن در مراکز مختلف مورد بررسی قرار گرفت. در این پژوهش مشخص شد حداقل میزان دوز موثر برای عضو مانند سر برابر ۰.۳۳ میلی سیورت می‌باشد.

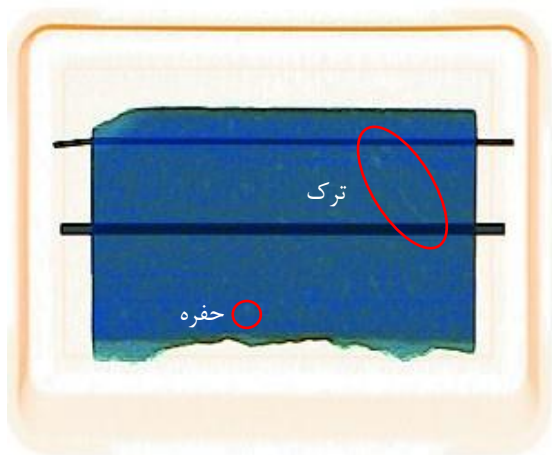


شکل ۷: دستگاه بازرسی چمدان مدل ۹۰۷۵

می‌باشد. قابل مشاهده است که نواحی کناری بتن نسبت به نواحی مرکزی آن با طیف رنگی روشن‌تری نمایش داده شده‌اند و هرچه به سمت مرکز نمونه حرکت کنیم بتن متراکم‌تر شده و در نتیجه طیف رنگی تیره‌تری می‌شود. همچنین می‌توان در شکل نواحی را مشاهده نمود که به صورت دایره‌هایی به رنگ سفید و یا خاکستری مشخص هستند، این نواحی نشان دهنده وجود حفرات در نمونه می‌باشند.

همچنین دو نمونه بتن مسلح استوانه‌ای به طول ۵۴ و قطر ۱۵ سانتی‌متر که تحت آزمایش، جهت بررسی اتصال کوپلر آرماتورها قرار گرفته بودند به وسیله توموگرافی کامپیوتری اشعه ایکس مورد بررسی قرار گرفتند. همانطور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، پس از آزمایش مشکلی در قسمت اتصال کوپلر به وجود نیامده است. همچنین همانطور که بیان شد در تصاویر رنگی نواحی که چگالی بالاتری نسبت به سایر نواحی دارند تیره‌تر نمایش داده می‌شوند. همانطور که در این شکل قابل مشاهده است آرماتور در ناحیه داخلی بتن به صورت تیره‌تر نمایش داده شده است و در نواحی خارجی با توجه به اینکه ماده دیگری وجود ندارد نسبت به محیط با رنگ آبی نمایش داده شده است.

در شکل ۱۲ میتوان نمونه استوانه دیگری پس از تصویربرداری را مشاهده نمود که دچار ترک خوردگی و شکستگی در ناحیه بتنی شده ولی در ناحیه اتصال کوپلر دچار مشکلی نشده است. با توجه به مطالب بیان شده در این شکل، وجود نواحی از بتن که دچار ترک خوردگی و شکستگی شده است، باعث تغییر چگالی ماده در آن ناحیه می‌شود، بنابراین در اثر این عیوب و کاهش چگالی، این نواحی با رنگی روشن‌تر نسبت به سایر نواحی نشان داده می‌شوند.



ضریب به چگالی جسم مورد نظر وابسته می‌باشد. حجم یک جسم ناشی از حجم عناصر آن جسم و یا به عبارتی وکسل می‌باشد. وکسل به کوچکترین عضو ساختاری یک تصویر گفته می‌شود. در یک تصویر سیاه و سفید ناشی از توموگرافی کامپیوتری اشعه ایکس، هر چه مقادیر تصویر روشن‌تر (سفیدتر) بیشتر باشد، نشان‌دهنده آن است که نرخ جذب اشعه ایکس در آن ناحیه و به عبارتی دیگر چگالی جسم در آن ناحیه بالاتر از سایر نواحی می‌باشد و در سمت مقابل هر چه مقادیر تصویر تیره‌تر (به سمت خاکستری یا سیاه)، نشان دهنده آن است که چگالی جسم در آن ناحیه کمتر می‌باشد.

در نتایج حاصل از بازرسی به وسیله تجهیزات فرودگاه، تفاوتی در تصاویر بدست آمده با تصاویر معمول توموگرافی کامپیوتری اشعه ایکس وجود دارد. تصاویر حاصل از این بازرسی به صورت رنگی می‌باشد. همچنین در این تصاویر برعکس تصاویر معمول، که در آنها نواحی با چگالی بالاتر روشن‌تر نمایش داده می‌شوند، نواحی با چگالی و تراکم بالاتر تیره‌تر نمایش داده می‌شوند. همچنین در این دستگاه، با توجه به نوع جسم مورد بررسی، رنگ تصاویر خروجی متفاوت می‌باشد.

همانطور که بیان شد ترک خوردگی در بتن از جمله عیوب آن می‌باشد که میتوان با کمک این روش آن را شناسایی کرد. اگر ترک در یک نمونه ایجاد شده باشد، چگالی ظاهری نمونه تغییر کرده، در حالی که ترک ممکن است به اندازه‌ای کوچک باشد که شناسایی نشود.

جهت بررسی نمونه‌ها در دستگاه بازرسی بار چمدان ابتدا با قرار گرفتن نمونه‌ها بر روی ریل دستگاه، نمونه‌ها وارد محفظه بازرسی می‌شوند. با عبور نمونه‌ها در داخل محفظه، اشعه ایکس به طور مداوم به نمونه تابیده می‌شود و از ابتدا تا انتها نمونه مورد بازرسی قرار می‌گیرد. در ادامه نتایج حاصل شده را مشاهده می‌نمایید.

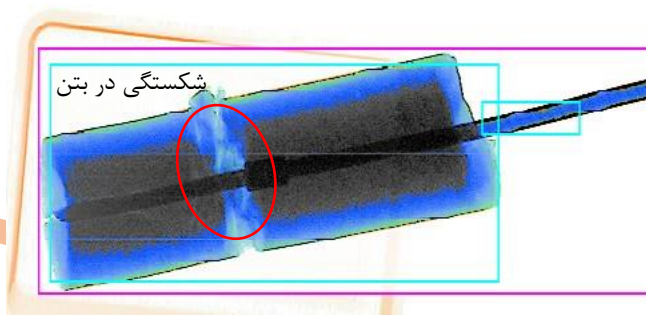
۵-۱- نمونه‌های بتن مسلح

همانطور که در شکل ۱۰ قابل مشاهده می‌باشد، میتوان یک ترک مورب در قسمت بالایی نمونه بتن مسلح را شناسایی نمود. با توجه به شکل، تغییر رنگ در این ناحیه نشان دهنده تغییر میزان چگالی، به دلیل تفاوت در مشخصات نمونه در آن ناحیه است. همچنین همانطور که بیان شد، میتوان با توجه به طیف رنگی متفاوت در این شکل میزان تراکم بتن در نواحی مختلف را مشاهده نمود. بدین صورت که هرچه نواحی پررنگ‌تر باشند تراکم در آن نواحی بیشتر

شکل ۱۰: نمایی از نتیجه تصویربرداری نمونه بتن مسلح مستطیلی

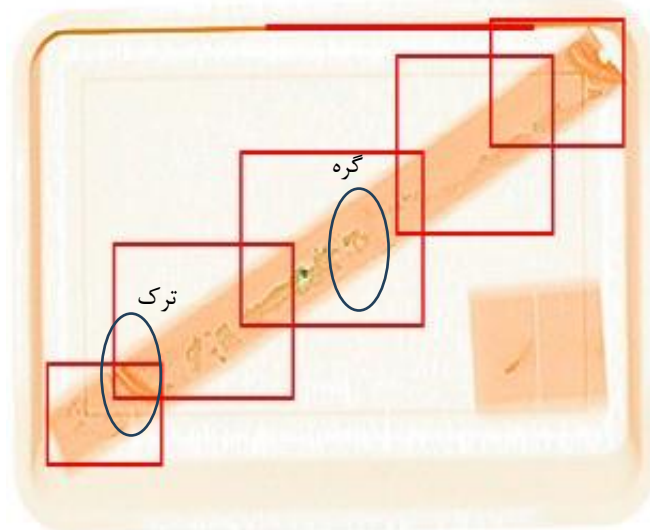


شکل ۱۱: نمایی از نتیجه تصویربرداری نمونه بتن مسلح استوانه‌ای ۱

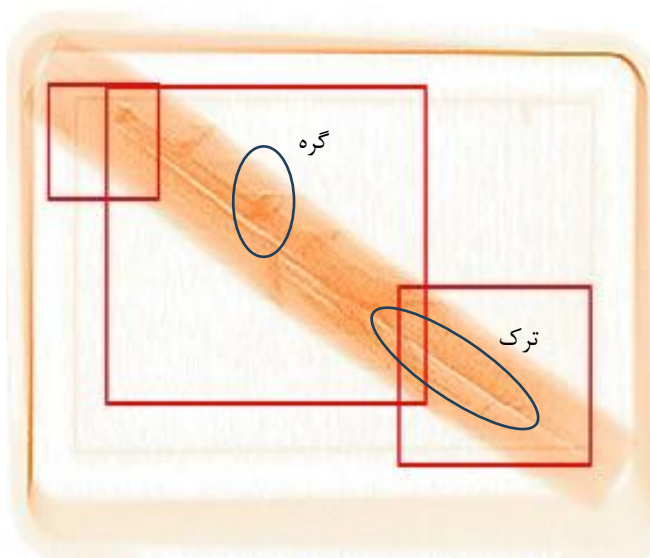


شکل ۱۲: نمایی از نتیجه تصویربرداری نمونه بتن مسلح استوانه‌ای ۲

تشخیص بهتر این موارد حداقل نیازمند بازرسی نمونه در دو جهت متفاوت هستیم.



شکل ۱۳: نمایی از نمونه چوب چهارتراش ۱



شکل ۱۴: نمایی از چوب چهارتراش ۲

۵-۲ - نمونه‌های چوبی

در نمونه‌های چوبی نیز وجود عیوبی مانند گره، پوسیدگی و ترک باعث کاهش مقاومت و استحکام می‌شود. در مقاطع چوبی نیز مانند مناطق بتنی وجود ترک باعث کاهش چگالی و در نتیجه مشاهده این نواحی با رنگ روشن‌تر می‌شود. در دو شکل ۱۳ و ۱۴ میتوان نتایج حاصل از بازرسی دو نمونه چوبی را مشاهده نمود. در شکل ۱۳ می‌توان وجود ترک در قسمت پایینی نمونه را مشاهده نمود که با توجه به تفاوت رنگ و روشن‌تر بودن قسمت ترک با سایر نواحی قابل تشخیص می‌باشد. همچنین در قسمت‌های مرکزی این شکل نواحی با طیف رنگی تیره‌تر قابل مشاهده می‌باشد، که نشان دهنده وجود گره در این نواحی است.

در شکل ۱۴ می‌توان یک ترک سراسری در طول نمونه را مشاهده نمود. همچنین قابل مشاهده می‌باشد که در قسمتی از نمونه تراکم و چگالی چوب نسبت به سایر نواحی در طول نمونه متفاوت می‌باشد، که این نواحی با توجه به تصاویر نسبت به سایر نواحی تیره‌تر بوده و قابل تشخیص می‌باشند. در این نواحی ممکن است گره وجود داشته باشد و یا تراکم چوب در این نواحی بیشتر از سایر نواحی باشد. برای

۶- نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج بدست آمده از کنترل نمونه‌ها و همچنین توان دستگاه بازرسی فرودگاه میتوان امیدوار بود با استفاده از تجهیزات و دستگاه‌های پیشرفته‌تر مانند دستگاه سی تی اسکن و یا میکرو سی تی به نتایج دقیق‌تر و قابل قبول‌تری دست پیدا کنیم. ولی به طور کلی میتوان به این موارد زیر اشاره نمود:

منابع

1. Qasrawi, H.Y., *Concrete strength by combined nondestructive methods simply and reliably predicted*. Cement and concrete research, ۲۰۰۰. ۳۰(۵): p. ۷۳۹-۷۴۶.
2. libretexts. 6.4: *The Compton Effect by OpenStax is licensed CC BY, except where otherwise noted*. ۲۰۱۶; Available from: OpenStax, O. (۲۰۲۲, September ۱۳). ۶,۴: The Compton Effect. Libretexts. <https://phys.libretexts.org/@go/page/۴۵۲۲>.
3. Compton, A.H., *A quantum theory of the scattering of X-rays by light elements*. Physical review, ۱۹۲۳. ۲۱(۵): p. ۴۸۳.
4. Caliskan, S. *Examining Concrete Cores by Nondestructive Techniques*. in *4th Middle East NDT Conference and Exhibition*. ۲۰۰۷. Citeseer.
5. Balázs, G.L., É. Lublóy, and T. Földes, *Evaluation of concrete elements with X-ray computed tomography*. Journal of Materials in Civil Engineering, ۲۰۱۸. ۳۰(۹): p. ۰۶۰۱۸۰۱۰.
6. Suzuki, T., T. Shiotani, and M. Ohtsu, *Evaluation of cracking damage in freeze-thawed concrete using acoustic emission and X-ray CT image*. Construction and Building Materials, ۲۰۱۷. ۱۳۶: p. ۶۱۹-۶۲۶.
7. Wei, Q., B. Leblon, and A. La Rocque, *On the use of X-ray computed tomography for determining wood properties: a review*. Canadian journal of forest research, ۲۰۱۱. ۴۱(۱۱): p. ۲۱۲۰-۲۱۴۰.
8. Xi, X. and S. Yang, *Investigating the spatial development of corrosion of corner-located steel bar in concrete by X-ray computed tomography*. Construction and Building Materials, ۲۰۱۹. ۲۲۱: p. ۱۷۷-۱۸۹.
9. Vicente, M.A., J. Mínguez, and D.C. González, *Computed tomography scanning of the internal microstructure, crack mechanisms, and structural behavior of*

- ۱- با توجه به نتایج بدست آمده برای بررسی دقیق نمونه‌ها با ضخامت زیاد، نیازمند حداقل تصویربرداری از دو جهت می‌باشیم
- ۲- با توجه به اینکه هرچه ضخامت نمونه بیشتر باشد، میزان ضریب تضعیف افزایش می‌یابد و در نتیجه شدت اشعه ایکس عبوری دچار کاهش می‌شود، با افزایش زمان تابش میتوان این مورد را کنترل نمود.
- ۳- با توجه به نتایج با مشخصات این دستگاه می‌توان حفرات، ترک‌ها و سایر عیوب را شناسایی نمود.
- ۴- برای شناسایی عیوب ریزتر مانند ترک‌های ریز، نیازمند تجهیزات دقیق‌تر مانند میکرو سی تی و همچنین افزایش زمان تابش می‌باشد.
- ۵- همانطور که توسط صدرا و همکاران بیان شد، کم‌ترین میزان دوز موثر ارسالی در دستگاه سی تی اسکن برای عضوی مانند سر برابر ۰.۳۳ میلی سیورت می‌باشد. با توجه به تراکم بیشتر نمونه های بتنی و همچنین دوز ارسالی توسط دستگاه بازرسی بار (۰.۰۰۰۸ میلی سیورت) می-توان عدم نمایش عیوب با وضوح بالا در تصاویر را توجیه نمود. بر همین اساس می‌توان نتیجه گرفت با استفاده از تجهیزات پیشرفته‌تر، نتایج مطلوب‌تری بدست خواهد آمد.

۷- تشکر و قدردانی

با تشکر از همکاری مدیریت فرودگاه بین‌المللی مهرآباد به جهت در اختیار قرار دادن تجهیزات مورد نیاز و همچنین همراهی مسئولان بخش فنی و مهندسی و حراست فرودگاه به جهت انجام هرچه بهتر آزمایشات و همچنین با تشکر از پژوهشگاه بین‌المللی مهندسی زلزله و زلزله شناسی برای حمایت‌های مالی صورت گرفته.

- Arc Welding. Sakarya University Journal of Science, 2019. 23(5): p. 896-901.
19. Deepak, J., et al., *Non-destructive testing (NDT) techniques for low carbon steel welded joints: A review and experimental study*. Materials Today: Proceedings, 2021. 44: p. 3732-3737.
 20. Yamada, T., et al., *In-situ X-ray Observation of Molten Pool Depth during Laser Micro Welding*. Journal of Laser Micro/Nanoengineering, 2012. 4(3).
 21. Stritt, P., et al. *Comprehensive process monitoring for laser welding process optimization*. in *High-Power Laser Materials Processing: Lasers, Beam Delivery, Diagnostics, and Applications V*. 2016. SPIE.
 22. Bernachy-Barbe, F., et al., *Using X-ray microtomography to study the initiation of chloride-induced reinforcement corrosion in cracked concrete*. Construction and Building Materials, 2020. 259: p. 119574.
 23. Michel, A., et al., *Monitoring reinforcement corrosion and corrosion-induced cracking using non-destructive x-ray attenuation measurements*. Cement and Concrete Research, 2011. 41(11): p. 1085-1094.
 24. Dong, B., et al., *Monitoring reinforcement corrosion and corrosion-induced cracking by X-ray microcomputed tomography method*. Cement and Concrete Research, 2017. 100: p. 311-321.
 25. McGovern, M., et al. *Detection and assessment of wood decay using X-ray computer tomography*. in *Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2010*. 2010. SPIE.
 26. Van den Bulcke, J., et al., *Three-dimensional X-ray imaging and analysis of fungi on and in wood*. Microscopy and Microanalysis, 2009. 15(5): p. 395-402.
 27. *fiber-reinforced concrete under static and cyclic bending tests*. International Journal of Fatigue, 2019. 121: p. 9-19.
 28. Han, J., et al., *Monitoring the evolution of accelerated carbonation of hardened cement pastes by X-ray computed tomography*. Journal of materials in civil engineering, 2013. 25(3): p. 347-354.
 29. Poinard, C., et al., *Compression triaxial behavior of concrete: the role of the mesostructure by analysis of X-ray tomographic images*. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2012. 16(sup1): p. s115-s136.
 30. Rossi, E., et al., *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, 2020. 235: p. 117474.
 31. Siryabe, E., et al., *X-ray digital detector array radiology to infer sagging depths in welded assemblies*. NDT & E International, 2020. 111: p. 102238.
 32. ÇALIGÜLÜ, U., et al., *X-ray radiography of AISI 4340-2205 steels welded by friction welding*. Materiali in tehnologije, 2016. 50(1).
 33. Yenumula, L., et al., *Radiographic evaluation of gas tungsten arc welded joints used in nuclear applications by X-and gamma-rays*. NDT & E International, 2019. 102: p. 144-152.
 34. Souza, M., et al. *Detection of lack of fusion weld defects by radiography*. in *AIP Conference Proceedings*. 2009. American Institute of Physics.
 35. Didžiokas, R., J. Januteniene, and J. Jonaityte, *The impact of the internal welding defects on the joint strength*. Transport, 2008. 23(3): p. 240-244.
 36. Türkmen, M., *X-Ray Radiography of Micro-alloyed Steel Joined by Submerged*

- rocks to concrete. Computed tomography-advanced applications, ۲۰۱۷: p. ۲۰۷-۲۳۰.
۲۷. Sadra, H., M. reza Deevband, and D. Sardary, *Estimated organ and effective dose from CT examinations using software impact at Shahid Beheshti University of Medical Sciences hospitals*. Research in Medicine, ۲۰۱۵. ۳۹(۱): p. ۲۶-۲۹.
۲۷. Salim, K., et al., *Characterization of Algerians oak wood by x-ray tomographic scanner and free software image-J*. Wood research, ۲۰۱۴. ۵۹(۲): p. ۳۳۵-۳۴۲.
۲۸. Riggio, M., et al., *In situ assessment of structural timber using non-destructive techniques*. Materials and structures, ۲۰۱۴. ۴۷(۵): p. ۷۴۹-۷۶۶.
۲۹. Chubinskii, A., et al., *Physical nondestructive methods for the testing and evaluation of the structure of wood-based materials*. Russian Journal of Nondestructive Testing, ۲۰۱۴. ۵۰(۱۱): p. ۶۹۳-۷۰۰.
۳۰. Ge, Z., et al., *The detection of structure in wood by X-ray CT imaging technique*. BioResources, ۲۰۱۸. ۱۳(۲): p. ۳۶۷۴-۳۶۸۵.
۳۱. Koddenberg, T., M. Zauner, and H. Militz, *Three-dimensional exploration of soft-rot decayed conifer and angiosperm wood by X-ray micro-computed tomography*. Micron, ۲۰۲۰. ۱۳۴: p. ۱۰۲۸۷۵.
۳۲. Grabner, M., D. Salaberger, and T. Okochi. *The need of high resolution μ -X-ray CT in dendrochronology and in wood identification*. in *2009 Proceedings of 6th International Symposium on Image and Signal Processing and Analysis*. ۲۰۰۹. IEEE.
۳۳. Parracha, J., et al., *Assessment of the density loss in anobiid infested pine using X-ray micro-computed tomography*. Buildings, ۲۰۲۱. ۱۱(۴): p. ۱۷۳.
۳۴. Lister, P. *Applications of x-ray computed tomography in the wood products industry*. in *16th WCNDT 2004-World Conference on NDT*. ۲۰۰۴.
۳۵. Halmshaw, R., *Industrial radiology: theory and practice*. Vol. ۱. ۱۹۹۵: Springer Science & Business Media.
۳۶. Vicente, M.A., J. Mínguez, and D.C. González, *The use of computed tomography to explore the microstructure of materials in civil engineering: from*