Journal of Research on Archaeometry 2024; 10 (1); 189-202

Journal of Reserarch on Archaeometry

DOI: http://dx.doi.org/10.61186/jra.10.1.367

Review Paper Open Access

# Absolute Dating of Ancient Limes Base Mortars Using $^{14}C$ Carbon Method

**Mehdi Razani[1*], Nazila Taghavi[2]**

1. Associate Professor Faculty of conservation Cultural Materials, Tabriz Islamic Art University, Tabriz, Iran
2. Lecturer, Faculty of conservation Cultural Materials, Tabriz Islamic Art University, Tabriz, Iran

Received: 2023/05/6 Accepted: 2023/09/13

**Abstract**

In this review article, we discuss the challenges and methods of dating ancient lime mortars using radiocarbon dating. The article highlights the difficulties in dating ancient lime mortars and the development of new methods to overcome these challenges. One of the approaches investigated for many years was the collection of different gas phases from the reaction of lime mortar with acid in order to date them. They conducted experiments to remove the effect of fossilized limestone or dead carbon. The mortar was washed with water and converted into smaller particles to create a suspension, which was then treated with alcohol to obtain particles in specific size ranges. The resulting micro powders were dried, and the gas phase produced from their reaction with phosphoric acid was collected and analyzed. The article includes challenges such as the difficulty in separating and dating the carbonate fraction of traditional mortars and the requirement for pre-screening methods. The most important strategies for dating mortars are categorized as accurate structural characterization of the mortar sample, examination of different carbonate fractions, proper separation of the mortar, and accurate measurement of $^{14}C$. Despite all efforts done up to today, finding a pure sample of lime mortar continues to be a challenge. In 2011, a new method called Cryo2SoniC was proposed and tested on artificial laboratory samples. The results were promising, leading to further experiments using the Cryo2SoniC method in various institutions and universities since 2013.

**Keywords:**

Ancient Mortar, Lime Mortar, Dating, Radiocarbon, $^{14}C$

* Corresponding Author: m.razani@tabriziau.ac.ir

©2024 by the Authours.This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license)
https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0

پژوهه باستان‌سنجی ۱۴۰۳؛ ۱۰(۱): ۲۰۲-۱۸۹

پژوهه باستان‌سنجی

DOI: http://dx.doi.org/10.61186/jra.10.1.367

دانشگاه هنر اسلامی تبریز ۱۳۷۸

مقاله مروری

# سال‌یابی مطلق ملاط‌های باستانیِ پایه آهکی با استفاده از روش کربن $^{14}C$

**مهدی رازانی[۱*]، نازیلا تقوی[۲]**

۱. دانشیار، گروه مرمت و باستان‌سنجی، دانشکده حفاظت آثار فرهنگی، دانشگاه هنر اسلامی تبریز، تبریز، ایران

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد باستان‌سنجی، دانشکده حفاظت آثار فرهنگی، دانشگاه هنر اسلامی تبریز، تبریز، ایران

**تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۱۶** **تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۲۲**

## چکیده

سال‌یابی ملاط‌های با ستانی و تعیین سن دقیق آثار و یادمان‌های تاریخی و فرهنگی، به‌عنوان یکی از مباحث مهم در حوزه با ستان شنا سی، همواره توجه پژوهشگران را به خود جلب کرده است. با پیشرفت علوم و پدیدار گشتن رویکردهای علوم میان‌رشته‌ای، استفاده از انواع روش‌های فیزیکی و شیمیایی برای بررسی‌های باستان‌سنجی ابنیه و آرایه‌های معماری، جایگاه ویژه‌ای یافته است. سال‌یابی یکی از محورهای مورد بحث در پژوهش‌های سنجه‌پذیر است و با توجه به اهمیت آن در مطالعات باستان‌شناختی می‌تواند به درک توالی و تعیین سن دقیق آثار و یادمان‌های تاریخی و فرهنگی منجر شود. نزدیک به ۶۰ سال از انجام آزمایش‌ها مربوط به سال‌یابی رادیو کربنی $^{14}C$ می‌گذرد و در این میان سال‌یابی رادیو کربن ملاط یکی از چالشی‌ترین پژوهش‌ها در این زمینه بوده است؛ زیرا امکان ارزیابی سال‌یابی مطلق برای این مصنوعات توسط رادیو کربن بستگی فراوانی به نحوه نمونه‌برداری و خالص‌سازی بست کربنی آن دارد. این مقاله با مروری بر تلاش‌های انجام‌یافته در زمینه سال‌یابی ملاط‌های باستانی به گونه‌شناسی انواع ملاط قابل سال‌یابی و بررسی دستورالعمل‌های مورد استفاده جهت انجام خالص‌سازی بست کربنی، با روش‌هایی نوآورانه و کارآمد می‌پردازد. همچنین به بررسی روش‌های جانبی ازجمله بررسی‌های کانی‌شناسی و سنگ‌شناسی ملاط‌های باستانی، به‌عنوان روش‌های مکمل برای سال‌یابی $^{14}C$ پرداخته است.

**واژگان کلیدی:** ملاط باستانی، ملاط آهکی، سال‌یابی، رادیو کربن، $^{14}C$.

* نویسندهٔ مسئول مکاتبات: m.razani@tabriziau.ac.ir

©2024 by the Authours.This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license)
https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0

## ۱. مقدمه

رویکرد پژوهشی علمی و کمّیِ کارآمد در زمینه‌ی تحقیقات علوم میراث فرهنگی دهه‌های اخیر ایران، به دلیل میان‌رشته‌ای بودن و کثرت موضوعات و توسعه و پیشرفت‌های حاصل در علوم مختلف، به سمت استفاده از دانش مستقر در رشته‌های فنی و مهندسی مختلف ذیل گرایش‌های باستان‌سنجی، حرکت می‌کند. مهم‌ترین محورهای مورد بحث در پژوهش‌های سنجه‌پذیر شامل سال‌یابی، ساختارشناسی منشأیابی، اصالت‌سنجی، شناسایی کاربری اشیاء و بازسازی فناوری‌های باستانی، دانش حفاظت و مرمت، دورسنجی و پیش‌یابی، باستان‌زیست‌شناسی، باستان زمین‌شناسی و دیرین‌اقلیم‌شناسی و سایبر باستان‌شناسی هستند؛ که پژوهشگران این عرصه با شناخت هرچه بیشتر این حوزه‌ها می‌توانند دامنه‌ی فعالیت‌های پژوهشی خود را گسترش دهند (Razani et al., 2021). همچنان که واضح و مبرهن است، ملاطها در جهان، تاریخی چند هزارساله دارند. ملاطها با ایجاد یک لایه حائل میان مصالح موجب چسبندگی و استحکام لایه‌ها به یکدیگر می‌شوند. به‌علاوه نقش ملاطها به‌عنوان اندودهای بیرونی و درونی و همچنین بندکشی را نباید از نظر دور داشت که عمدتاً هم نقش سازه‌ای داشته‌اند و هم نقش لایه محافظ و هم در کاربردهایی با محور آرایه‌های اندودی زیبایی‌شناسانه مورد استفاده قرارگرفته‌اند. به عبارتی می‌توان گفت ملاطها در ارتباط مستقیم با فرهنگ‌ها و فناوری‌های گذشته در معماری هستند (Zmarshidi, 2013; Razani & Hamzavi, 2018). در بسترهای تاریخی، مطالعات مختلفی بر روی ملاطها انجام می‌شود که عمدتاً در قالب: ۱) ساختارشناسی و منشأیابی، ۲) بازسازی فناوری ساخت، ۳) سال‌یابی، ۴) ارزیابی خواص ذاتی و گیرایی و ۵) بهینه‌سازی برای اقدامات حفاظتی و مرمتی را شامل می‌شوند (Razani et al., 2018). ملاطهای مورد استفاده در یک بنای تاریخی انواع متفاوتی دارند و این تنوع از عوامل متفاوتی همانند: ۱) وضعیت محیطی و اقلیمی، ۲) شرایط نیرویی و بارگذاری، ۳) نوع عملکرد مورد انتظار از ملاط، ۴) امکانات موجود در منطقه، ۵) دانش و فن‌آوری موجود در منطقه، ۶) مقطع زمانی ساخت بنا و ۷) صرفه‌جویی و توجه به مسائل اقتصادی در نوع ملاط متأثر است (Fayazi et al., 2015). از طرفی ملاطها به دو دسته ملاطهای هوازی و بی‌هوازی تقسیم‌بندی می‌شوند. ملاطهای هوازی برای گیرش و رسیدن به مقاومت نیاز به حضور هوا و ($CO_2$) موجود در آن دارند؛ اما ملاطهای بی‌هوازی نیازی به حضور هوا ندارند (Hami, 2015; Gaspar-Tebar, 1996) در میان انواع مختلف ملاطهای سنتی، ملاطهای گل، گچ و آهک بیشترین فراوانی را دارند. در طول تاریخ ملاطهای آهک بیشترین استفاده را در سراسر جهان داشته‌اند و تلاش‌های زیادی برای تاریخ‌گذاری آن‌ها در ۵۰ سال گذشته با روش‌های رادیو کربن و بعداً با استفاده از لومینسانس انجام‌شده است (Sanjurjo-Sánchez, 2016).

ملاطهای پایه آهکی وابسته به نوع سنگی که از آن حاصل می‌شوند، دارای خواص فیزیکی و ماهیت متفاوت هستند. ملاطهای پایه آهکی به دلیل سازگاری بالا با سایر مصالح ساختمانی و نفوذپذیری خوبی که به بخارآب دارند، کاربرد بالایی در طول تاریخ داشته‌اند. ملاطهای آهکی نسبتاً انعطاف‌پذیر بوده و به جهت ویژگی خوددرمانی که دارند، در طول زمان دچار انحلال جزئی و رسوب مجدد مواد آهکی درون خود شده و قادر به پر کردن ترک‌های مویی ایجادشده در ساختارشان هستند. آهک موجود در ساختار ملاطهای آهکی، از مواد معدنی مانند کلسیم یا منیزیم، ایجاد می‌شود؛ که در آهک منیزیمی، بخشی از کلسیم کربنات‌های موجود در سنگ آهک با منیزیم جایگزین گشته و فرمول $Mg(CaO_3)_2$ تحت عنوان آهک دولومیتی، حاصل می‌شود. ملاطهای آهکی حاوی کلسیم به چهار دسته، آهک غیر هیدرولیکی، آهک نیم هیدرولیکی یا ضعیف، آهک نسبتاً هیدرولیکی و آهک کاملاً هیدرولیکی، تقسیم می‌شوند. آهک غیر هیدرولیکی در ساختار خود، حدود ۹۴٪ کلسیم کربنات $CaCO_3$ دارد. از ترکیب آن با پوزولان، آهک پوزولانی یا آهک فرموله شده حاصل می‌شود. آهک نیم هیدرولیکی یا ضعیف در ساختار خود دارای ۶ تا ۱۲٪ ناخالصی است درحالی‌که مقدار این ناخالصی در آهک نسبتاً هیدرولیکی به ۱۲ تا ۱۸٪ افزایش می‌یابد. آهک کاملاً هیدرولیکی بین ۱۸ تا ۲۵٪ ناخالصی دارد (England, 2012). ملاط خراسانی یا سرخه ملاط از کهن‌ترین ملاطهای مورد استفاده در معماری ایران بوده است و از آهک، شاموت (سرامیک

پخته و خرد شده) یا گَرد آجر ساخته می‌شده است. این نوع ملاط هیدرولیک، ضد آب و مقاومت فشاری بیشتری نسبت به ملاط آهکی هوازی دارد (Mota-López et al., 2018). استفاده از این ملاط‌ها برای ساخت سازه‌های خانگی، رواج بیشتری نسبت به ملاط‌های آهک پوزولانی داشته است. وجه تمایز ملاط خراسانی، وجود اجزاء سیلیکاتی فراوان در ساختار آن است. ذرات سیلیکاتی ناشی از شاموت و گرد آجر به این ملاط رنگ مایل به قرمز می‌دهد (Michalska et al., 2017).

از طرفی سال‌یابی به معنای مرتب‌سازی زمانی داده‌ها و پیش درآمدی ضروری برای درک توالی و مراحل وقایع گذشته است (Bahrololumi Shapoor Abadi, 2012). در ادبیات و دانسته‌های این بخش نسبت به دیگر حوزه‌های مذکور در مورد ملاط‌های باستانی، کمتر مورد توجه محققین و باستان‌شناسان ایرانی قرار گرفته است. با گاه‌نگاری یافته‌های باستانی شامل اشیاء و ابنیه، قادر خواهیم بود پیشرفت و تغییر و تحولات صورت گرفته در گذشته را مطالعه کنیم؛ و انگیزه نهایی برای کاوش‌های طولانی و پرهزینه باستان‌شناسی توسط باستان‌شناسان نیز اغلب تاریخ‌گذاری سازه‌های مختلف است. ملاط برخلاف سایر مصالح یا مصنوعات قابل تجزیه و تحلیل و تاریخ‌گذاری، در هر مرحله از کار ساختمان، همانند پی، دیوارچینی، اندودها و آرایه‌های معماری به‌وفور کاربرد داشته است و از این رو می‌توان از آن به‌عنوان ماده مهمی برای تاریخ‌گذاری بسیاری از محوطه‌های باستان‌شناسی استفاده کرد. از دیگر ضرورت‌های یافتن راه‌های مطمئن برای سال‌یابی بست‌ها و ملاط‌های مورد استفاده در سازه‌های معماری از این واقعیت ناشی می‌شود که گواهی مستقیم بر تحولات و تغییرات ساختاری در معماری هستند. برای مثال می‌توان انواع ملاط‌های کربناته را در دیوارنگاره‌ها (به‌عنوان نقاشی‌های دیواری و تزیینات) و جزء اساسی در ساخت مخازن و آبراهه‌های آبی دانست (Michalska, 2019). سال‌یابی ملاط‌های باستانی در گذشته با پیچیدگی‌های فراوان و صرف زمان زیادی انجام می‌پذیرفت؛ اما امروزه سال‌یابی رادیوکربنی بست کربناته ملاط‌های تاریخی، یک موضوع تحقیقاتی راهبردی و فاقد پیچیدگی است (Ricci et al., 2022). به واسطه پروژه سال‌یابی ملاط، سال‌یابی ملاط $^{14}C$ در برخی آزمایشگاه‌های دنیا نیز محبوبیت بیشتری پیدا کرده است و دستورالعمل‌های جدید یا اصلاح شده‌ای برای آماده‌سازی ملاط توسط پژوهشگران متعددی ارائه شده است (Hajdas et al., 2017). در این مقاله پس از بررسی مختصری در رابطه با روش‌های سال‌یابی مطلق و نسبی، به بررسی تاریخچه استفاده از سال‌یابی $^{14}C$ برای ملاط‌های باستانی، اصول سال‌یابی $^{14}C$ در ملاط‌های پایه آهکی و چالش‌های پیش رو در این روند پرداخته شده است.

## ۲. روش‌های سال‌یابی مطلق و نسبی

سال‌یابی پیش درآمدی ضروری برای درک توالی و مراحل وقایع گذشته است که از موضوعات اصلی مورد مطالعه در حوزه‌ی باستان‌سنجی محسوب می‌شود (Stern, 2001). انتخاب روش سال‌یابی به میزان نمونه، محدوده زمانی قابل سال‌یابی با روش مدنظر، دقت مورد نیاز، تجهیزات سال‌یابی در دسترس و نیز هزینه در نظر گرفته شده برای آزمایش‌های سال‌یابی بستگی دارد (Hashemi Zarajabad, 2013). تعیین دقیق اینکه یک بازه زمانی چه زمانی (سال) رخداده است، در تمامی موارد ضروری نیست و تنها با تعیین این نکته ساده که آن واقعه قبل و بعد از چه واقعه دیگری رخداده است، می‌تواند به بسیاری از پرسش‌های مطرح شده پاسخ دهد. این تفکر که یک یافته یا واقعه نسبت به واقعه دیگری تقدم یا تأخر زمانی دارد، پایه و اساس سال‌یابی نسبی است. بااین‌حال، نکته مهم در مطالعات مربوط به یافته‌های باستانی تعیین سن دقیق و درک کامل از وقایع مختلف و یا قسمت‌هایی از یک توالی است؛ که در این صورت نیازمند روش‌های سال‌یابی مطلق خواهیم بود. سال‌یابی مطلق به ما کمک می‌کند تا سرعت تحولات یا وقایعی را که به‌طور هم‌زمان رخداده یا در زمان‌های مختلف در نواحی مختلف دنیا به وقوع پیوسته‌اند، تجزیه و تحلیل نماییم. روش‌های سال‌یابی از اوایل قرن گذشته ابداع‌شده و دانش باستان‌سنجی را متحول ساخته‌اند (Sehati, 2018). ازجمله روش‌های سال‌یابی مطلق می‌توان به برخی روش‌ها همانند سال‌یابی پتاسیم آرگون، سال‌یابی رادیو کربن، سال‌یابی ترمولومینسانس، سال‌یابی تشدید اسپین الکترونی،

سال‌یابی رد شکافت هسته‌ای، روش‌های دیرین مغناطیس‌سنجی مطلق، روش‌های سال‌یابی ایزوتوپی، سال‌یابی درختی و سال‌یابی سری اورانیم اشاره کرد (Baillie, 2014; Walker, 2013; Rixhon et al., 2017).
با استفاده از انواع روش‌های باستان‌سنجی می‌توان ملاط‌ها، اندودهای بیرونی و درونی و بندکشی‌ها را مورد بررسی قرار داد و نتایج و داده‌های جالب و دقیقی در مورد منشأ مواد خام موجود در آن‌ها و همچنین روش‌های مختلف فناوری ساخت مانند خرد کردن، الک کردن، مخلوط کردن و پختن را به دست آورد (Bahrololumi Shapoor Abadi, 2012). از دوره پیش از تاریخ تا عصر حاضر، امر ساخت‌وساز و معماری شاهد استفاده از مواد ساده‌ای چون رس تا موادی با ساختار پیچیده‌تر مانند بتن‌ها، به‌عنوان بست بوده است. همان‌طور که می‌دانیم بست‌ها کاربردهای گسترده‌ای در معماری دارند. ازجمله کاربردهای بست‌ها می‌توان به استفاده از آن‌ها به‌عنوان ضدآب‌سازی سازه و یا اندودها اشاره کرد (Addis et al., 2019).
در طول تاریخ از اندودهای آهکی در تزیینات فرسکو و در ساخت آبراه‌ها و مخازن استفاده شده است. با این توضیح اجمالی می‌توان پی برد که با سال‌یابی ملاط‌ها می‌توان سیر تغییرات و تحولات استفاده از مواد مختلف به‌عنوان ملاط‌ها و اندود را شناسایی نمود (Urbanová et al., 2020). در طی تحقیقات چند دهه اخیر، از روش‌های مختلفی برای سال‌یابی ملاط‌های سنتی استفاده شده است؛ که ازجمله این موارد می‌توان به سال‌یابی کربن ۱۴، لومینسانس و مغناطیس‌سنجی اشاره کرد. در این مقاله به بررسی تاریخچه ابداع و سیر تحول و تطور روش‌های مبتنی بر سال‌یابی کربن ۱۴ می‌پردازیم.

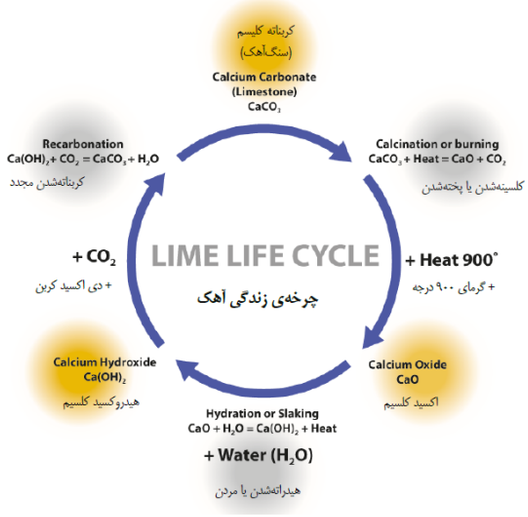
## ۳. تاریخچه استفاده از سال‌یابی $^{14}C$ برای ملاط‌های باستانی

از میان انواع ملاط‌ها، ملاط‌های آهکی در سرتاسر جهان بیشترین استفاده را داشته و تلاش‌های زیادی برای سال‌یابی یافته‌های حاصل از کاوش‌های باستان‌شناسی صورت گرفته است. پیشینه اختصاصی این بررسی به دهه ۱۹۶۰ و تلاش محققان فرانسوی برای سال‌یابی $^{14}C$ برخی از مواد آلی، برمی‌گردد. ایده انجام این مقایسه گاه‌نگاری متقابل، ریشه در دهه‌ها پژوهشی دارد که توسط چندین گروه انجام‌شده است. نخستین تلاش‌ها برای تاریخ‌گذاری ملاط‌ها، هم‌زمان با ابداع روش $^{14}C$ انجام شد. تحقیقات دلیبرس و لاییری (Labeyrie & Delibrias 1964)، استیور و همکاران (Stuiver et al., 1965) و همچنین فولک و والسترو (Folk & Valastro, 1976)، تلاش‌های آغازین محسوب می‌شوند. آن‌ها بر این باور بودند که اگر ملاط‌های باستانی در ترکیب خود مواد آلی داشته باشند می‌توان از سال‌یابی کربن ۱۴ برای تاریخ‌گذاری آن‌ها استفاده کرد. در حقیقت منظور از سال‌یابی $^{14}C$، تعیین لحظه کربناتاسیون آهک در هنگام ساختن ابنیه بود. بااین‌حال، تنها چند دهه بعد بود که ون استریدونک و همکاران (Van Strydonck et al., 1983)، رینگبوم و رمر (Ringbom, & Remmer, 1995) و هاین‌مایر و همکاران (Heinemeier et al., 1997)، رویکرد سامانمندی‌تری برای سال‌یابی رادیو کربن ۱۴ ملاط‌ها ارائه کردند و دستورالعمل‌های کلی برای انجام سال‌یابی $^{14}C$ ارائه شد. سال‌یابی ملاط‌ها با وجود سال‌ها تلاش تا دهه ۱۹۷۰، بدون نتیجه مورد نظر باقی ماند. مشکل اصلی، وجود ناخالصی‌ها در تمام مصالح ساختمانی مشتق از آهک بود. ناخالصی‌هایی که می‌توانند به‌طور جدی بر نتیجه تجزیه آزمایشگاهی تأثیر بگذارند. دانشمندی به نام ون استرایدونک از مؤسسه سلطنتی میراث فرهنگی در بروکسل توصیه کرد که بقایای $^{14}C$ در ملاط که در قطعات چوب یا زغال چوب جاسازی‌شده در ملاط را می‌توان با روش طیف‌سنجی جرمی شتاب‌دیده[1] AMS سال‌یابی کرد (Hale et al., 2003). به دنبال این امر، تحولات روش‌شناختی متفاوتی انجام شد. ابتدا توسط ناروکا و همکاران (Nawrocka et al., 2005) با بررسی جداسازی بست از ملاط توسط فرایندهای انجماد، یخ گشایی[2] و جدایش سنگ‌دانه‌ها قبل از انحلال و بعداً توسط لیندروس و همکاران با انحلال متوالی ملاط‌ها، صورت گرفت (Lindroos et al., 2011; Ringbom et al., 2011). مثال‌هایی شاخص از مطالعات سال‌یابی ملاط‌های باستانی مربوط به فعالیت‌های رینگبوم و همکاران ارائه شده است؛ که در طی ۱۹ سال تحقیقات، به مطالعات سال‌یابی رادیو کربنی ملاط‌های باستانی در مناطق مختلفی مانند، ۱) کلیساهای جزایر آلاند (در مجمع‌الجزایر بین فنلاند و سوئد)، ۲) کلیساها در مجمع‌الجزایر ابولند[3] (SW فنلاند)، ۳) مکان‌هایی

در شبه‌جزیره ایبری ازجمله توره د پالما[۴] (روستای رومی در پرتغال) و ۴) رم، پمپئی و هرکولانیوم (ایتالیا) پرداخته‌اند و نتیجه این روش را کارآمد ارزیابی می‌کنند (Ringbom et al., 2011)

## ٤. اصول سال‌یابی $^{14}C$ در ملاط‌های پایه آهکی

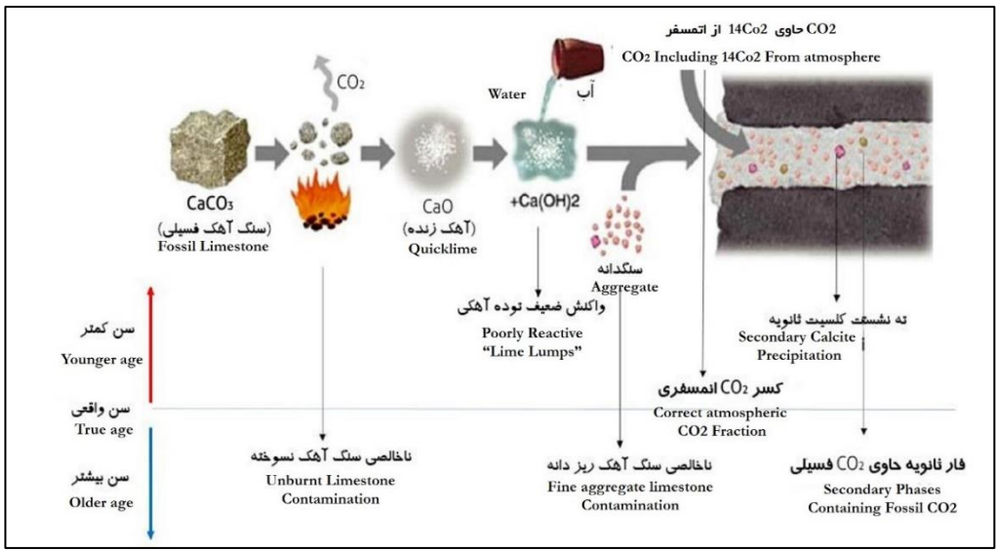
در فرآیند ساخت آهک و سپس به‌کارگیری آن مشابه ملاط‌های آهکی، مطابق (شکل ۱)، سنگ آهک($CaCO_3$) به CaO اکسید سپس این اکسید با آب وارد واکنش شده و به $Ca(OH)_2$ هیدروکسید می‌شود. $Ca(OH)_2$ با آب و ماسه مخلوط گشته و در تماس با هوا، باعث سخت شدن ملاط آهکی از طریق جذب دی‌اکسید کربن $CO_2$ هوا که حاوی $^{14}C$ بوده وارد می‌شود و بدین ترتیب سنگ آهک یا همان $CaCO_3$، تشکیل می‌شود. در حقیقت تعیین تاریخ دقیق زمان ساخته‌شدن یک سازه، از طریق سال‌یابی کربن موجود در $CO_2$ اضافه شده طی فرآیند سخت شدن سنگ آهک است (Weyer et al., 2015).




شکل ۱: چرخه ساخت و تشکیل ملاط‌های آهکی (Weyer et al., 2015).

بزرگ‌ترین چالش در سال‌یابی $^{14}C$ ملاط‌های آهکی، انتخاب روش صحیح استخراج و تخلیص نمونه ملاط برای آزمایش است؛ زیرا در بیشتر مناطق سن به‌دست آمده با سن واقعی ملاط، مطابقت نداشته است. حضور سنگ‌های فسیلی و یا سایر موارد کربناتی فسیلی در مخلوط ملاط و همچنین امکان احتراق ناقص سنگ آهک در حضور $CO_2$ هوا و متعاقباً تأخیر در سخت شدن ملاط، باعث ایجاد خطا در سال‌یابی $^{14}C$ ملاط‌های آهکی، می‌شود (Van Strydonck et al., 1991). می‌دانیم تمام مصالح ساختمانی مبتنی بر آهک، یعنی ملاط آهکی، اندود داخلی، اندود خارجی و رنگاب سفید در حین سفت شدن، دی‌اکسید کربن اتمسفر را جذب می‌کنند و به این ترتیب $^{14}C$ در مصالح به‌دست آمده از آهک در زمان دقیق ساخت سازه، تثبیت می‌شود و از آن لحظه شمارش مقادیر کربن $^{14}C$، درست مانند بقایای هر گیاه یا حیوانی بلافاصله پس از مرگ، شروع می‌شود؛ بنابراین، اگر بتوان آنالیز $^{14}C$ را برای ملاط به‌کار برد، می‌توان زمانی که ساختمان ساخته شده است را محاسبه کرد. از مشکلات سال‌یابی به روش $^{14}C$ حضور قطعات چوبی موجود در ملاط است که می‌توانند از چوب قدیمی‌تر تهیه شوند؛ بنابراین امکان دارد از چند سال تا چندین قرن قدیمی‌تر از ساختمانی باشند که ملاط در آن یافت شده است (Hale et al., 2003). راهکار این مشکل، آنالیز مستقیم ملاط آهک است (Heinemeier et al., 1997). باستان‌شناسان و کارشناسان ملاط‌های باستانی اهمیت سال‌یابی قابل اعتماد ملاط را کاملاً درک کرده و برای بهینه کردن نتایج حاصل از سال‌یابی ملاط‌های باستانی تلاش‌های زیادی انجام داده‌اند. از دلایل رویکرد استفاده از روش سال‌یابی $^{14}C$ توسط دانشمندان، اصول اساسی ساده آن در سال‌یابی است (Hale et al., 2003). (شکل ۲) به بررسی عواملی که باعث تخمین

نادرست سن ملاط می‌شوند، می‌پردازد. یکی از مشکلات بر سر راه سال‌یابی دقیق سن ملاط‌های سنتی، وجود کربنی است که سنی کمتر از سن واقعی ملاط دارد. همان‌طور که می‌دانیم، سخت شدن ملاط با سرعت‌های متفاوت در طی سال‌ها و دهه‌ها انجام می‌پذیرد و در برخی موارد، سرعت سخت شدن پایین باعث می‌شود سن ملاط، کمتر از سن واقعی آن محاسبه شود (Sanjurjo-Sánchez & Alves, 2012). همچنین به دلیل وجود آب در محیط اطراف ملاط (به‌عنوان مثال، آب باران و یا آب‌های زیرزمینی) ساختار سنگ آهک کربناتی تحت تأثیر قرارگرفته و باعث انحلال و تبلور مجدد $CaCO_3$ و متعاقباً کمتر شدن سن ملاط سنتی از زمان به‌کارگیری آن در سازه می‌شود (Heinemeier et al., 1997).

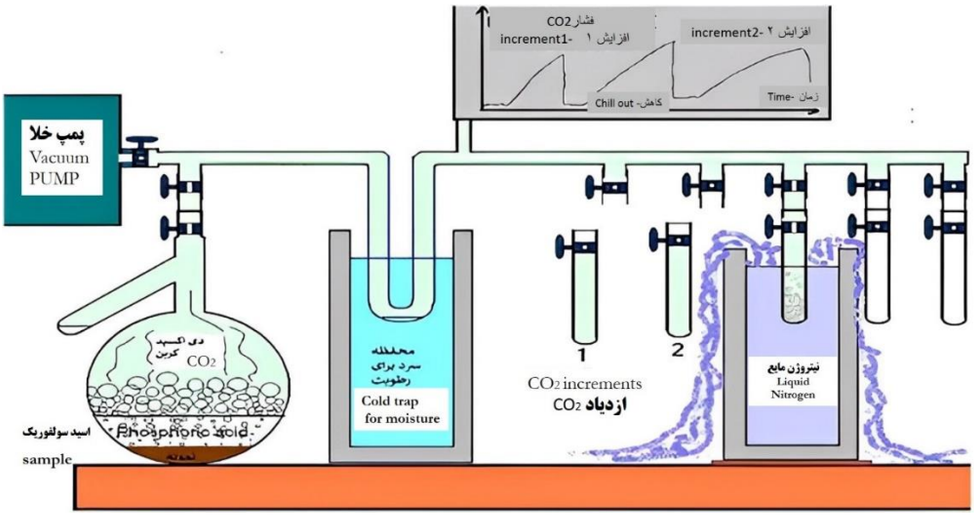



شکل ۲: چرخه ساخت و تشکیل ملاط‌های مبتنی بر آهک و دلایل ایجاد خطا در تعیین سن دقیق ملاط باستانی (Urbanová et al., 2020)

اولین تلاش‌ها برای کاهش درصد خطا در سال‌یابی ملاط باستانی، توسط فولک والاسترو در سال‌های ۱۹۷۶ و ۱۹۷۹ انجام گرفت. آن‌ها از انواع روش‌های مکانیکی و شیمیایی برای جدایش سنگ آهک ملاط از نمونه‌های قدیمی‌تر موجود در ملاط برای نمونه‌برداری دقیق استفاده کردند (Folk, & Valastro, 1976; Folk et al.,1979). در جدایش مکانیکی، اصولاً از تفاوت سختی بین دانه‌های سخت‌تر سنگ آهک‌های قدیمی از کربنات‌های ظریف‌تر ملاط‌ها، صورت می‌پذیرفت. اساس کار، جدایش شیمیایی است که در مرحله بعدی انجام می‌شود. تفاوت در واکنش‌پذیری سنگ‌دانه‌های کربناتی ملاط‌های سنتی با سنگ‌دانه‌های کربناتی فسیلی است؛ به‌نحوی‌که سنگ‌دانه‌های کربناتی ملاط‌ها سریع‌تر با اسید واکنش داده و با جمع‌آوری فاز گازی حاصل از این واکنش و سال‌یابی $CO_2$ موجود در آن، می‌توان به نتایجی صحیح دست‌یافت. موضوع جدایش مکانیکی و شیمیایی و یافتن راه‌های بهینه برای انجام آن، همواره مورد بررسی قرار گرفته است و از مهم‌ترین مراحل در خالص‌سازی بست آهکی برای انجام سال‌یابی $^{14}C$ است (Ortega et al., 2012).

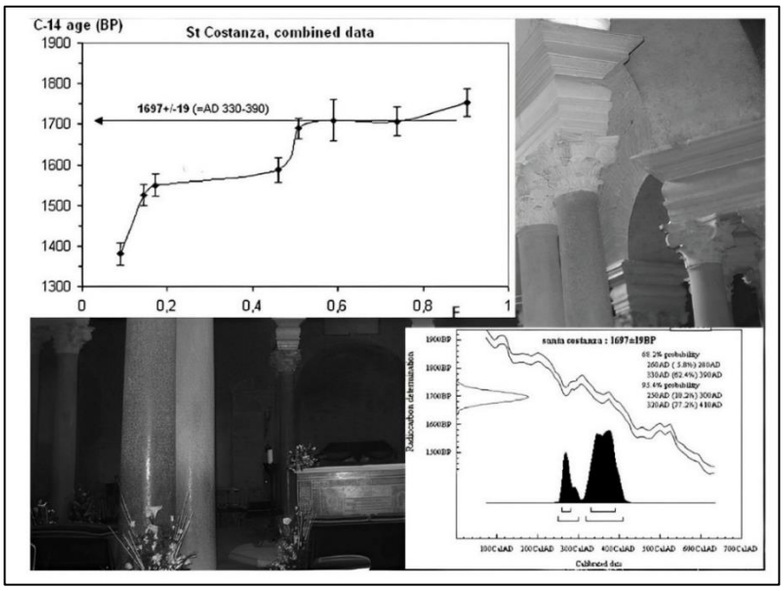
با پیشرفته‌تر شدن آزمایش‌ها توسط ون استریدانک و همکاران در سال ۱۹۸۶، نتایج با میزان خطای کمتری به دست آمد. بدین صورت که آن‌ها سعی در جمع‌آوری چند فاز گازی با توجه به تفاوت فشار در گازهای خروجی حاصل از واکنش ملاط سنتی با اسید کردند و هر فاز را مورد سال‌یابی قرار دادند (Van Strydonck et al., 1986). این تلاش برای حذف اثر سنگ آهک فسیلی یا به‌اصطلاح کربن مرده[5] بعدها توسط سنین و همکاران در سال ۲۰۰۱ نیز ادامه یافت. آن‌ها با استفاده از روش سنتی که توسط فولک والسترو در سال‌های ۱۹۷۶ و ۱۹۷۹ ارائه شد، ابتدا ملاط را با آب شست‌وشو دادند و آن‌ها را به قطعات ریزتر تبدیل کردند به حالتی که سوسپانسیون ایجاد شد. سوسپانسیون با آب الک شد، دانه‌هایی در محدوده دانه‌های ۶۲-۷۴، ۴۳-۶۲ و کمتر از ۴۳ میکرون به دست آید. میکرو پودرهای حاصل را در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد خشکانده و فاز گازی حاصل از طی واکنش آن‌ها با اسید فسفریک ۸۵٪، جمع‌آوری و $CO_2$ آن مورد سال‌یابی قرار گرفت

(Sonninen & Jungner, 2001). نمونه کربنات (۲۰ میلی‌گرم) و اسید (۲ میلی‌لیتر) به ظرفی با بازوی جانبی وارد شد. محفظه شروع به چرخش کرد و تغییرات فشار در طی واکنش، ثبت گردید. فشار در ۶۰ ثانیه اول و در پایان واکنش ثبت شد. زمان واکنش برای ملاط ۱۰–۳۰ دقیقه و برای کربنات سنگ آهک ۵۰–۹۰ دقیقه بود (Hale et al., 1999). از سال ۲۰۰۲ در دستورالعمل‌های ارائه‌شده، بررسی حداقل ۵ فاز گازی مختلف برای سال‌یابی $^{14}C$ در مرحله جداسازی، ضروری دانسته شد. مطابق (شکل ۳)، نمونه پس از جدایش مکانیکی در اسید فسفریک حل شده و با اتصال به پمپ خلأ، کربن دی‌اکسید خارج‌شده طی ۵ مرحله، جمع‌آوری شد. این سیستم به یک دستگاه ثبت‌کننده میزان فشار گاز $CO_2$ متصل و تغییرات هر مرحله ثبت شد. با بررسی و رسم نمودار مطالعات بیشتر انجام گرفت (Ringbom et al., 2006)




شکل ۳: جدایش شیمیایی بخارهای حاصل از ملاط آهکی به ۵ بخش مجزا (Ringbom et al., 2006)

مطالعات بر روی نمودار رسم شده در (شکل ۴)، نشان می‌دهد که هرگاه نمودار مربوطه حالتی ایستا و ثابت پیدا کرد، سن مربوط به آن دوره، سن واقعی ملاط است.




شکل ۴: نمودار سال‌یابی $^{14}C$ و یافتن سن حقیقی بست آهکی ملاط در سانتا کوستانزا (آرهوس و بعداً توسط واحد شتاب‌دهنده رادیو کربن، آکسفورد تأیید شد) (Ringbom et al., 2006)

لیندوس و همکاران در طی تحقیقات خود به این نتیجه رسیدند که جداسازی و سال‌یابی بخش کربناتی مربوط به ملاط‌های سنتی به این راحتی نبوده و در واقع نیاز به روش پیش غربالگری برای دستیابی به نتایج معتبر لازم دارد (Lindroos et al., 2011). از دیدگاه آن‌ها رعایت ۴ راهبرد مهم در سال‌یابی ملاط‌ها ضروری است.

۱. ساختارشناسی دقیق مشخصات نمونه ملاط؛

۲. بررسی بخش‌های مختلف کربناتی در نمونه، تاریخچه فیزیکی و شیمیایی نمونه و ارزیابی احتمال جداسازی کسر قابل سال‌یابی از نمونه؛

۳. استخراج و جدایش صحیح بست؛

۴. اندازه‌گیری صحیح $^{14}C$.

بااین‌حال تلاش‌ها جهت ارائه روشی برای دستیابی به نمونه خالص از بست آهکی ملاط‌ها ادامه داشت. اولین بار در سال ۲۰۱۱، استفاده از دستورالعمل CryoSoniC براساس روش انتخاب فیزیکی (التراسونیک) پیشنهاد و برای آزمایش کارایی آن، از نمونه‌های آزمایشگاهی مصنوعی بدون افزودن سنگ‌دانه‌ها، استفاده شد. نتایج خوب و کاربردی این روش و استفاده از روش‌های شیمی تجزیه، باعث گردید تا اجرای روش CryoSoniC به دستورالعملCryo2SoniC که روشی ساده و کاربردی برای سال‌یابی ملاط‌های باستانی است، تبدیل شود (Marzaioli et al., 2011). از سال ۲۰۱۳ طیف وسیعی از آزمایش‌ها بر مبنای روش Cryo2SoniC تا به امروز در مؤسسات و دانشگاه‌های مختلف انجام می‌شود (Nonni et al., 2013). Cryo2SoniC در واقع روشی پیش غربالگری است که بر روی ملاط انتخاب شده برای سال‌یابی انجام می‌پذیرد. نام آن مخفف سه مرحله اصلی آن شامل انجماد و شِکنش به روش کریو بریکینگ[۶]، خالص‌سازی دو مرحله‌ای با استفاده از امواج فراصوت[۷] و سانتریفیوژ[۸] کردن است. در این روش قبل از اقدام به سال‌یابی ابتدا ماهیت نمونه ملاط مورد بررسی قرار گرفته و سپس آلودگی‌های موجود در بست ملاط از آن جدا می‌شود (Nonni, 2014). سال ۲۰۱۹ گروه تحقیقاتی مشترک پادووا کازرتا، نسخه دوم Cryo2SoniC را به‌منظور تعیین مشخصات کانی‌شناسی ملاط‌ها و اطمینان از جدایش صحیح، طی ۴ مرحله، با جزئیات کامل، ارائه کردند (Addis et al., 2019). مطابق (شکل ۵)، این چهار مرحله به شرح زیر هستند.

مرحله (۱) ساختارشناسی ملاط به منظور ارزیابی ماهیت آلاینده‌ها و اتخاذ روشی برای حذف آن‌ها انجام می‌گیرد. از انواع روش‌های سنگ‌شناسی و کانی‌شناسی مانند میکروسکوپ نوری(OM)، طیف‌سنجی نوری کاتولومینسانس(CL-OS) پراش پرتو X (XRPD) استفاده می‌شود. اطلاعات جمع‌آوری شده از انجام این روش‌ها، در انتخاب چرخه و روش‌های حذف ماده آلاینده، بسیار مؤثر است.

مرحله (۲) عبارت از خالص‌سازی نمونه با استفاده از روش‌های استخراجی چون امواج اولتراسونیک، سانتریفیوژ و رسوب-سنجی ثقلی انجام می‌پذیرد. در این مرحله ذرات نمونه پس از استفاده از دستگاه اولتراسونیک و سپس سانتریفیوژ، به مدت ۲۰ دقیقه در آب خالص به‌صورت شناور قرار می‌گیرند؛ تا طبق قانون استوکس، ذرات چسبنده کوچک‌تر از ۵μm برای اجرای مرحله بعدی، حاصل شوند. در پایان زمان ته‌نشینی، سوسپانسیون بالایی با استفاده از سیستم پمپ خلأ و فیلترهای غیر آلی با اندازه ۰/۱ میکرومتر، نمونه‌برداری می‌شود.

مرحله (۳) شامل ساختارشناسی نمونه پودری حاصل است تا از اثربخشی روش‌های به‌کار رفته برای خالص‌سازی اطمینان حاصل شود.

مرحله (۴) شامل سال‌یابی رادیو کربنی پودر خالص که حاصل بست آهکی ملاط و فاقد آلودگی بوده، بخش نهایی کار است.

شکل ۵: مراحل انجام نسخه دوم از فرآیند جدایش بست آهکی ملاط به روش Cryo2sonic پیش از انجام سال‌یابی $^{14}C$ (Addis et al., 2019)

## ۵. روش‌های مکمل دستیابی به داده‌های دقیق برای سال‌یابی $^{14}C$

با اتفاق‌نظر محققین حوزه سال‌یابی $^{14}C$ ، این نتیجه گرفته شد که پیش غربالگری و شناسایی ملاط‌ها بایستی با رویکردی استاندارد قبل از انجام سال‌یابی $^{14}C$، انجام شوند تا داده‌های به‌دست آمده صحیح و قابل ارزیابی باشند.

در حالت کلی دستورالعمل جامع که برای سال‌یابی ملاط‌های باستانی باید رعایت شوند، عبارت‌اند از: فعالیت‌های تحقیقاتی انجام‌گرفته در سال‌های متفاوت توسط وندرل ساز و همکاران (Vendrell-Saz et al.,1996)، فرانزینی و همکاران (Franzini et al., 1999)، کریزی و همکاران (Crisci et al., 2004)، السن (Elsen, 2006)، اورتگا و همکاران (Ortega et al., 2012)، نشان داد بررسی کانی‌شناسی و سنگ‌شناسی ملاط‌های سنتی بایستی به دقت انجام پذیرد. برای انجام این کار معمولاً از روش‌های کانی‌شناسی سنتی استفاده می‌شود.

دستورالعمل‌های پیشنهادی توسط کریزی به این صورت بیان می‌شوند که در وهله اول آنالیز مقطع نازک هر فاز ملاط، بافت‌های میکرو، توسط میکروسکوپ‌های نوری و الکترونی (میکروسکوپ نوری بازتابی، RLOM، میکروسکوپ الکترونی روبشی با طیف‌سنجی پراکنده انرژی، SEM/EDS) انجام گیرد. در وهله دوم ارزیابی کمی فازهای کریستالی توسط پراش پرتوایکس به روش پودری (XRPD) و ارزیابی محتوای آمورف با آنالیز مشخصات کامل پیشرفته با استفاده از استاندارد داخلی (تحلیل کمی فاز مبتنی بر ریتفلد، QPA) و طیف‌سنجی مادون‌قرمز تبدیل فوریه یا همان FTIR و در آخر ارزیابی کمی فازهای حاوی $H_2O$ و $CO_2$ توسط آنالیزهای حرارتی (آنالیز حرارتی، TGA، آنالیز حرارتی دیفرانسیل، DTA، کالریمتری اسکن تفاضلی، DSC، مورد بررسی قرار گیرند (Crisci et al., 2004).

موکرجی بیان می‌کند که استفاده از این دستورالعمل‌ها و روش‌های مکمل قبل از سال‌یابی $^{14}C$، باعث می‌شود اطلاعات دقیقی از ماهیت فازهای کریستالی و آمورف موجود در ماده، تاریخچه دانه‌های کربناتی از نظر توالی تبلور، حالت تعادل، یا تاریخچه انجام واکنش آن‌ها، به دست بیاید (Mukherjee, 2012).

با توجه به همه موارد یاد شده باز هم چالش‌برانگیزترین مرحله از بررسی‌های سال‌یابی، اطمینان از خلوص کربنات‌های مربوط به ملاط است. استفاده از طیف‌سنجی کاتودولومینسانس به‌عنوان یک روش قدرتمند برای تشخیص مقادیر کم کربنات زمینی در نمونه مورد استفاده قرار می‌گیرد (Machel, 2000). این روش که در زمین‌شناسی رایج بود در اوایل دارای چالش‌هایی برای استفاده در سال‌یابی ملاط‌های باستانی داشت؛ اما امروزه با درک دقیق رابطه بین جایگزین‌های کریستالی- شیمیایی در شبکه کربنات کلسیم و سیگنال لومینسانس اندازه‌گیری شده، ابزاری مفید و بسیار حساس برای شناسایی و تشخیص کربنات‌های فسیلی موجود در ساختار ملاط سنتی است (Toffolo et al., 2019). همچنین روش آنالیزی رزونانس مغناطیسی هسته‌ای حالت جامد (SS_MAS_NMR) ابزاری قدرتمند برای تشخیص آثار جزئی واکنش‌های هیدرولیکی مانند حضور اجزای غنی از سیلیس فعال (موجود در مواد آتش‌فشانی، پوزولان‌ها، ملاط خراسانی) در نمونه است (Urbanová et al., 2020). سیگنال‌های حاصل از NMR به حضور کاتیون‌های خاصی مانند $^{27}Al$ و $^{29}Si$ در بست حساس هستند؛ بنابراین این روش می‌تواند کمک زیادی به روشن کردن نقش و حضور محصولات واکنشی خاص در بست را ارائه کند و شیوه‌ای کلیدی در تعیین خلوص قسمت بست مربوط به ملاط سنتی باشد که برای سال‌یابی $^{14}C$ از آن استفاده می‌شود. در روشی دیگر ایزوتوپ‌های پایدار اکسیژن و کربن مورد بررسی قرار گرفتند و طی روشی که توسط

کصدنار و لگنشتاین ارائه شد، توالی شکنش ایزوتوپی به‌طور تجربی بازتولید و تفسیر شد. به‌طوری‌که اکنون چارچوبی مفهومی برای تفسیر الگوهای شکنش در دسترس است. بااین‌حال، در بسیاری از موارد عملی، به دلیل پیچیدگی ساختار ملاط، مقادیر شکنش اندازه‌گیری شده از ترکیب چندین فرآیند واکنش ناشی می‌شوند و تفسیر آن‌ها به‌راحتی قابل انجام نیست (Kosednar-Legenstein et al., 2018).

## ٦. نتیجه‌گیری

سال‌یابی بناهای تاریخی به دلیل عدم وجود اسناد تاریخی مکتوب کاری دشوار است. از طرفی روش‌های سال‌یابی مطلق امکانی را فراهم آورده‌اند که می‌توان با به‌کارگیری آن‌ها زمان ساخت ابنیه و آرایه‌های معماری را به‌صورت مطلق تشخیص و تعیین کرد. سال‌یابی $^{14}C$، بیش از نیم‌قرن است برای تعیین سن دقیق ملاط‌های پایه آهکی که در بخش‌های مختلف پی ابنیه و تزئینات تا ملاط‌های بیرونی و درونی و میان مصالح مورد استفاده قرارگرفته است. از طرفی نمونه‌برداری صحیح و رفع چالش‌های مربوط به آماده‌سازی و جداسازی بست کربنی به‌منظور انجام سال‌یابی، دو چالش بزرگ این کار تحقیقاتی هستند. تحقیقات و آنالیزهای بسیاری برای دستیابی به روشی مطلوب برای خالص‌سازی و سال‌یابی بست کربنی انجام گرفته است. در ایران با وجود بناهای شاخص درباری و مذهبی، قلعه‌ها، پل‌ها و سدهای منسوب به دوره‌های مختلف، تاکنون اقدام به سال‌یابی مطلق ملاط‌های تاریخی و باستانی نشده است و مطالعات اغلب براساس مطالعات تطبیقی، لایه‌نگاری باستان‌شناسی و سال‌یابی بر مصالح دیگر مانند چوب و استخوان انجام می‌گرفته است. ازاین‌رو امید است با بومی‌سازی روش‌های سال‌یابی ملاط‌های باستانی آهکی با تأکید بر روش $^{14}C$، اقدامی شایسته در انجام مطالعات باستان‌سنجی کشور انجام شود. در حال حاضر مراکزی در کشور فلسطین اشغالی و انگلستان اقدام به سال‌یابی ملاط‌های پایه آهکی می‌نمایند که با توجه به هزینه‌های سال‌یابی در این مراکز و همچنین روابط علمی و سیاسی موجود، تلاش در بومی‌سازی این روش‌ها ضروری به نظر می‌رسد.

## سپاسگزاری

بدین‌وسیله از دانشگاه هنر اسلامی تبریز که با در اختیار نهادن امکانات مادی و معنوی موجب انجام این تحقیق شد سپاسگزاری می‌شود. این مقاله حاصل انجام طرح پژوهشی با عنوان «بررسی روش‌های سال‌یابی ملاط‌ها با تأکید بر گاه‌نگاری بناهای تاریخی» با شماره A-10-1286-6 با حمایت مالی معاونت پژوهشی در دانشگاه هنر اسلامی تبریز است.

## مشارکت نویسندگان

نویسنده اول در این مقاله به مباحث مربوط به مفهوم‌سازی، مدیریت داده‌ها، تحلیل رسمی و نوشتن پیش‌نویس اصلی پرداخته است و نویسنده دوم اقدامات مربوط به تکمیل موارد بالا، بررسی منابع و بررسی و ویرایش بخش‌های مختلف مقاله را بر عهده داشته است.

## پی‌وشت ها

1. .AMS: Accelerator Mass Spectrometry
2. .Freezing and thawing cycles
3. .Åboland
4. .Tour de Palma
5. .Dead carbon

۶. Cryo-breaking: روش کریو برکینگ، برای خالص¬سازی بست آهکی ملاط برای سال‌یابی C۱۴ است. برای آنالیز نمونه ابتدا آن را در نیتروژن مایع یا سایر عوامل برودتی منجمد می¬کنند و سپس با استفاده از ابزارهای خرد کننده، فرآیند شکنش برای تهیه پودر از نمونه، انجام می¬گیرد. برای استخراج بست آهکی، فرآیندهای دیگری بر روی نمونه پودری انجام می‌شود. این روش باعث استخراج خالص نمونه کربنی حاصل از بست گشته و به بهبود نتایج حاصل از سال‌یابی C۱۴ کمک می‌کند.

7. Double Sonication
8. Centrifugation.

## فهرست منابع


Addis, A., Secco, M., Marzaioli, F., Artioli, G., Arnau, A. C., Passariello, I., ... & Brogiolo, G. P. (2019). Selecting the most reliable 14C dating material inside mortars: the origin of the Padua Cathedral. Radiocarbon, 61(2), 375-393.

Bahrololumi Shapoor Abadi, F. (2012). Dating Methods in Archaeology, Tehran: SAMT, [In Persian]

Baillie, M. G. (2014). Tree-ring dating and archaeology. Routledge.

Crisci, G. M., Franzini, M., Lezzerini, M., Mannoni, T., & Riccardi, M. P. (2004). Ancient mortars and their binder. Periodico di Mineralogia, 73(3), 259-268.

Elsen, J. (2006). Microscopy of historic mortars—a review. Cement and concrete research, 36(8), 1416-1424.

England, H. (2012). Practical building conservation: Mortars, plasters and renders. Ashgate Publishing, Ltd.

Fayazi, M., Heydari Bani, D., & Imantalab, H. (2015). Technology of Banoo Sahra bridge mortars using XRF, XRD tests. Athar Journal. 36 (71): 109-114 [In Persian]

Folk, R. L., & Valastro Jr, S. (1976). Dating of lime mortar by carbon-14. In Radiocarbon Dating, 9th Int. Conf., Proceedings (pp. 721-732).

Folk, R. L., Valastro, S., Berger, R., & Suess, H. E. (1979). Dating of lime mortar by 14C. In Radiocarbon Dating: Proceedings of the Ninth International Conference. Berkeley: University of California Press. p (pp. 721-30).

Franzini, M., Leoni, L., Lezzerini, M., & Sartori, F. (1999). On the binder of some ancient mortars. Mineralogy and Petrology, 67(1-2), 59.

Gaspar-Tebar, D. (1996). Morteros de albañilería: clasificación y propiedades (pp. 179-192).

Hajdas, I., Lindroos, A., Heinemeier, J., Ringbom, Å., Marzaioli, F., Terrasi, F., ... & Guibert, P. (2017). Preparation and dating of mortar samples—Mortar Dating Inter-Comparison Study (MODIS). Radiocarbon, 59(6), 1845-1858.

Hale, J., Heinemeier, J., Lancaster, L., Lindroos, A., & Ringbom, Å. (2003). Dating Ancient Mortar: Although radiocarbon dating is usually applied to organic remains, recent work shows that it can also reveal the age of some inorganic building materials. American scientist, 91(2), 130-137.

Hale, J. R., Ringbom, Å., Lindroos, A., & Heinemeier, J. (1999). A datação por radiocarbono de argamassas, facendo uso de técnica AMS (Espectrometra de Massa com Acelerador). A Cidade: Revista Cultural de Portalegre, (13-14), 1999-2000.

Hami A. (2015). Building materials science.edt,25 Tehran: Tehran University. [In Persian]

Hashemi Zarajabad, H. (2013) Dating techniques in archaeology. Literature and humanities (Birjand University.: 2(4). 274-237. [In Persian]

Heinemeier, J., Jungner, H., Lindroos, A., Ringbom, Å., von Konow, T., & Rud, N. (1997). AMS 14C dating of lime mortar. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 123(1-4), 487-495.

Kosednar-Legenstein, B., Dietzel, M., Leis, A., & Stingl, K. (2008). Stable carbon and oxygen isotope investigation in historical lime mortar and plaster–Results from field and experimental study. Applied Geochemistry, 23(8), 2425-2437.

Labeyrie, J., & Delibrias, G. (1964). Dating of old mortars by the carbon-14 method. Nature, 201(4920), 742-742.

Lindroos, A., Heinemeier, J., Ringbom, Å., Brock, F., Sonck-Koota, P., Pehkonen, M., & Suksi, J. (2011). Problems in radiocarbon dating of Roman pozzolana mortars. In Building Roma Aeterna: Current Research on Roman Mortar and Concrete (pp. 214-230). Societas Scientiarum Fennica.

Machel, H. G. (2000). Application of cathodoluminescence to carbonate diagenesis. In Cathodoluminescence in geosciences (pp. 271-301). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Marzaioli, F., Lubritto, C., Nonni, S., Passariello, I., Capano, M., & Terrasi, F. (2011). Mortar radiocarbon dating: preliminary accuracy evaluation of a novel methodology. Analytical Chemistry, 83(6), 2038-2045.

Michalska, D. (2019). Influence of different pretreatments on mortar dating results. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 456, 236-246.

Michalska, D., Czernik, J., & Goslar, T. (2017). Methodological aspect of mortars dating (Poznań, Poland, MODIS). Radiocarbon, 59(6), 1891-1906.

Mota-López, M. I., Fort, R., Álvarez de Buergo, M., Pizzo, A., Maderuelo-Sanz, R., Meneses-Rodríguez, J. M., & Ergenç, D. (2018). Characterization of concrete from Roman buildings for public spectacles in Emerita Augusta (Mérida, Spain). Archaeological and Anthropological Sciences, 10, 1007-1022.

Mukherjee, S. (2012). Applied mineralogy: applications in industry and environment. Springer Science & Business Media.

Nawrocka, D., Michniewicz, J., Pawlyta, J., & Pazdur, A. (2005). Application Of Radiocarbon Method for Dating of Lime Mortars. Geochronometria: Journal on Methods & Applications of Absolute Chronology, 24.

Nonni, S. (2014). An innovative method to select a suitable fraction for mortar 14C dating: the Cryo2SoniC protocol.

Nonni, S., Marzaioli, F., Secco, M., Passariello, I., Capano, M., Lubritto, C., ... & Terrasi, F. (2013). 14C mortar dating: the case of the Medieval Shayzar Citadel, Syria. Radiocarbon, 55(2), 514-525.

Ortega, L. A., Zuluaga, M. C., Alonso-Olazabal, A., Insausti, M., Murelaga, X., & Ibañez, A. (2012). Improved sample preparation methodology on lime mortar for reliable 14C dating. Radiometric dating, 3-20.

Razani, M., Sehati, F., & B Kasiri, M. (2021). Archaeometry in the Cultural Heritage Studies and Art (Definitions, Future Trends and Challenges). Journal of Research on Archaeometry, 7(1), 1-30. [In Persian] DOI: 10.52547/jra.7.1.1

Razani, M., & Hamzavi, Y. (2018). Characterization of historic mortar from the architectural decoration and plaster of Rocky Temple of Verjuy in Maragheh, Iran. Journal of Research on Archaeometry, 4(2), 21-33. [In Persian] DOI: 10.29252/jra.4.2.21

Razani, M., Baghbanan, A. R., Emami, S. M. A., & Delgado Rodrigues, J. (2018). Optimization of traditional lime-based mortars for cement replacement toward consistent conservation of rocky architecture of the kandovan historical village. Housing and Rural Environment, 37(161), 125-138. [In Persian] DOI: 10.22034/37.161.125

Ricci, G., Secco, M., Addis, A., Pistilli, A., Preto, N., Brogiolo, G. P., ... & Artioli, G. (2022). Integrated multi-analytical screening approach for reliable radiocarbon dating of ancient mortars. Scientific Reports, 12(1), 3339.

Ringbom, Å., & Remmer, C. (1995). Ålands kyrkor, Volym I, Hammarland och Eckerö, Naturvetenskaplig datering. Mariehamn. p, 60-8.

Ringbom, Å., Heinemeier, J., Lindroos, A., & Brock, F. (2011). Mortar dating and Roman pozzolana, results and interpretations. In Building Roma Aeterna: Current Research on Roman Mortar and Concrete (pp. 187-208). Societas Scientiarum Fennica.

Ringbom, Å., Hale, J., Heinemeier, J., Lindroos, A., Brock, F., & Dunkeld, M. (2006). The use of mortar dating in archaeological studies of Classical and Medieval structures. In Proceedings of the Second International Congress on Construction History (Vol. 3, pp. 2613-33).

Rixhon, G., Briant, R. M., Cordier, S., Duval, M., Jones, A., & Scholz, D. (2017). Revealing the pace of river landscape evolution during the Quaternary: recent developments in numerical dating methods. Quaternary Science Reviews, 166, 91-113.

Sanjurjo-Sánchez, J. (2016). An overview of the use of absolute dating techniques in ancient construction materials. Geosciences, 6(2), 22.

Sanjurjo-Sánchez, J., & Alves, C. (2012). Decay effects of pollutants on stony materials in the built environment. Environmental Chemistry Letters, 10, 131-143.

Sehati, F. (2018). Theoretical foundations and principles of Archaeometry, Master's thesis, Tabriz, Iran, Faculty of Conservation and archaeometry TIAU: 50-70 [unpublished]

Sonninen, E., & Jungner, H. (2001). An improvement in preparation of mortar for radiocarbon dating. Radiocarbon, 43(2A), 271-273.

Stern, W. B. (2001). Archaeometry–Analyzing the Cultural Heritage. Chimia, 55(11), 915-915.

Stuiver, M., Smith, C. S., Chatters, R. M., & Olson, E. A. (1965). Radiocarbon dating of ancient mortar and plaster. In Proceedings of the 6th International Conference on Radiocarbon and Tritium Dating. Washington, DC: US Department of Commerce. p (pp. 338-41).

Toffolo, M. B., Ricci, G., Caneve, L., & Kaplan-Ashiri, I. (2019). Luminescence reveals variations in local structural order of calcium carbonate polymorphs formed by different mechanisms. Scientific reports, 9(1), 16170.

Urbanová, P., Boaretto, E., & Artioli, G. (2020). The state-of-the-art of dating techniques applied to ancient mortars and binders: a review. Radiocarbon, 62(3), 503-525.

Van Strydonck, M. J., Van der Borg, K., De Jong, A. F., & Keppens, E. (1991). Radiocarbon Dating of Lime Fractions and Organic Material from Buildings. Radiocarbon, 33(2), 254.

Van Strydonck, M., Dupas, M., Dauchot-Dehon, M., Pachiaudi, C., & Marechal, J. (1986). The influence of contaminating (fossil) carbonate and the variations of δ13C in mortar dating. Radiocarbon, 28(2A), 702-710.

Van Strydonck, M., Dupas, M., & Dauchot-Dehon, M. (1983). Radiocarbon Dating of Old Mortars in Proceedings of the First International Symposium C and Archaeology, Groningen 1981. Pact. Revue du Groupe Européen d'Etudes pour les Techniques Physiques, Chimiques et Mathématiques Appliquées à l'Archéologie Rixensart, (8), 337-343.

Vendrell-Saz, M., Alarcón, S., Molera, J., & García-Vallés, M. (1996). Dating ancient lime mortars by geochemical and mineralogical analysis. Archaeometry, 38(1), 143-149.

Walker, M. (2013). Quaternary dating methods. John Wiley & Sons.

Weyer, A., Roig Picazo, P., Pop, D., Cassar, J., Özköse, A., Vallet, J. M., & Srša, I. (2015). EwaGlos-European illustrated glossary of conservation terms for wall paintings and architectural surfaces (Vol. 17). Michael Imhof Verlag.

Zmarshidi, H. (2013) Decorative arts and amazing phenomena of moulding in Iranian architecture, Iranian Islamic City Studies., 5(17): 19-34 [In Persian]

بحرالعلومی شاپورآبادی، فرانک. (۱۳۹۲). روش‌های سال‌یابی در باستان‌شناسی. تهران: سمت.

حامی، احمد. (۱۳۹۵). مصالح ساختمانی. تهران: دانشگاه تهران.

رازانی، مهدی و حمزوی یاسر. (۱۳۹۷). ساختارشناسی ملاط‌های تاریخی در آرایه‌های معماری و اندود داخلی معبد صخره‌ای ورجووی مراغه، ایران: پژوهه باستان سنجی. ۴ (۲): ۲۱-۳۳.

رازانی، مهدی؛ باغبانان، علی‌رضا؛ امامی، سیدمحمدامین و خوزه، دلگادو رودریگوئز. (۱۳۹۷). بهینه سازی ملات‌های سنتی پایه آهکی برای جایگزینی سیمان در راستای حفاظت سازگار از معماری صخره‌کند روستای تاریخی کندوان. مسکن و محیط روستا. ۳۷ (۱۶۱): ۱۲۵-۱۳۸

رازانی، مهدی؛ صحتی، فاطمه و باقرزاده‌کثیری مسعود. (۱۴۰۰). باستان‌سنجی در مطالعات میراث فرهنگی و هنر (تعاریف، گرایش ها و چالش های آینده): پژوهه باستان سنجی. ۷ (۱): ۱-۳۰.

زمرشیدی، حسین. (۱۳۹۳). هنرهای تزئینی و پدیده‌های شگرف گچبری در معماری ایران، مطالعات شهر ایرانی اسلامی، ۵(۱۷): ۱۹- ۳۴.

فیاضی، مرال؛ حیدری بنی، داریوش و حامد ایمان طلب. (۱۳۹۴). فن‌شناسی ملاط‌های پل بانو صحرا با استفاده از آزمایش‌های XRD, XRF. فصل نامه علمی اثر.۳۶ (۷۱): ۱۱۴-۱۰۹.

هاشمی‌زرج‌آباد، حسن. (۱۳۸۳). تکنیک‌های تاریخ‌گذاری در باستان‌شناسی. ادبیات و علوم انسانی (دانشگاه بیرجند ). ۲(۴)، ۲۳۷-۲۷۴.