Journal of Research on Archaeometry, 2021; 7 (2): 183-195

Journal of Research on Archaeometry

DOI: 10.52547/jra.7.2.183

URL: https://jra-tabriziau.ir/

Technical Papers

# Radiocarbon Calibration and Stratigraphic Analysis in Archeology: Using the OxCal Program

**Sahar Yazdani [*1], Nasir Eskandari [2]**

*[1]. Ph.D candidate, Department of Archaeology, University of Tehran, IRAN*
*[2]. Assistant Professor, Department of Archaeology, University of Tehran, IRAN*

**Received: 14/08/2021** **Accepted: 21/12/2021**

**Abstract**

In today's archaeological studies, the use of absolute chronology by radiocarbon or carbon 14 dating is common and can even reduce errors due to incorrect stratigraphy and disturbed layers. The measurement accuracy of this method is very high with proper sampling, and with the advancement of science and technology, software programs were created to perform specialized and lengthy calculations to convert and calibrated the results. One of these programs is OxCal, which seems to be useful for researchers both online and offline. In this article, in addition to a brief explanation of how to perform this sorting, we will teach you how to use this program for single data, phases, subphases (adjacent phases) and overlapping phases in a very simple way without need for coding. The basis of archaeological studies is to know and understand the sequence of events and activities that are obtained from the archaeological findings. There are numerous dating methods in modern archeology around the world that are constantly being updated. One of the most common and popular chronological methods is radiocarbon dating analysis, which is better known as carbon 14 dating.

**Keywords:** Calibration, OxCal, C14, AMS, Varamin Jiroft.

*Corresponding Author: yazdani.sahar@ut.ac.ir

*Copyright© 2021, the Authors | This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-.NonCommercial terms*

## Introduction

C14 is an unstable isotope (radioactive isotope) of Carbon. Plants and animals absorb C14 from carbon dioxide throughout their lives. When they die, they stop exchanging carbon with the biosphere and their C14 volume begins to decrease at the rate specified in the law of radioactive decay (with a half-life of about 5,730 years). Radiocarbon dating is a method primarily designed to measure residual radioactivity, meaning that by measuring the amount of C14 in the residues, we can estimate the time of death by considering the half-life of the isotope.Radiocarbon measurements are conventionally called radiocarbon dating (CRA) [1]. This measurement was initially performed by Beta counters[6], which counted the number of betas radiated from decaying carbon atoms. The new method is called accelerator mass spectrometry (AMS), which counts all C14 atoms in a sample (unlike the previous method), so it can be used for smaller samples and also responds faster[7]. To determine the age of a sample that is being tested by the Beta counting method, its ratio of activity to standard activity must be determined. For this purpose, a sample whose activity is known to us will be measured and compared with the original sample[6]. The results obtained from the AMS method are expressed in the ratio of C12, C13 and C14 [7]. The results of both methods require modifications in the ratio of C14 to C12.

The other importent poi is that Radiocarbon dating cannot directly determine the absolute chronology for archaeological studies; Rather, it should be converted to an equivalent calendar age using the homogeneity curve (to compensate for atmospheric fluctuations in carbon concentration 14) [11]. The parameters used for these corrections are taken from hundreds of radiocarbon dating samples on tree rings whose exact age we know (Dendrochronology or tree-ring dating).[۵]

Nowadays, a variety of reliable programs has been offered by which we can perform complex calculations and Bayesian analysis [15] in the shortest time, and increase the reliability of error calculation, such as BCal[16], OxCal [17] and DateLab.[۱۸]

## What is OxCal?

In 1995, the OxCal program was developed by Christopher Bronk Ramsey [16] under the C ++ programing language, using statistical methods and Bayesian theory, to calibrate datings with calibration curves from tree-ring dating, and some Corrections needed to convert to calendar age, such as the use of the IntCal [11]. this program is also a tool for post-excavation analysis. By having stratigraphical information, it can provide archaeologists with the beginning and end of each phase, transitional periods, sequences, etc. in the form of tables and graphs. If a mistake has been made in stratigraphy, it will be determined in these analyzes.

To use this program online or download it for different operating systems, visit https://c14.arch.ox.ac.uk.

For toturial of using oxcal just follow the instructions step by step which show in figures 1 to 4 in this article.

## Using OxCal for dating results of the site of Varamin (Kerman province,iran)

For a practical example of this program, according to the explanations mentioned, we want to know how to do calibration and analysis for the data of the site of Varamin( Jiroft area), which has been excavated by one of the authors of this article [20]. The site has been stratigraphied by its excavators and consists of two periods, and 12 samples from 8 different layers have been dated. According to the stratigraphical information, we know that this area has been used continuously in the Late Chalcolithic to the Early Bronze age, and we must witness the transitional period of Chalcolithic to Bronze age of Jiroft in this area; Therefore, we used the analysis of adjacent phases on oxcal and enter 2 in the Number of Phases section. The final diagram (Figure 8) shows that the Late Chalcolithic period of this site was 3600-3300 BC and after a short transition period (ca.100 years), it resetteled in the beging of the early Bronze age period, which lasted until 2700 BC. In addition, this diagram clearly shows the correctness of the primary stratigraphy.

## Conclusion

Laboratory measurements on a sample indicate an age, which only indicates the age of the radiocarbon sample, and due to the use of standards such as the Libyan standard in radiocarbon testing, corrections are needed to convert the result into an accurate chronology and calendral age; Therefore, using calibration curves based on known age samples (mainly tree-ring dating) and also using statistical analysis, calendar age is obtained. On the other hand, in order to obtain the homogeneity curve, remarks such as the hemispheres effect or the marine effect must also be considered. To obtain the calibration curve and calculate the calendar age in the Northern Hemisphere, a curve called IntCal is used, which was introduced to the world in 1998, and the latest update of this curve is called IntCal 20. Software programs that were gradually introduced to the world of science greatly shortened these long and complex calculations.

One of these programs is OxCal, which is a user-friendly program and has the ability to analyze data and create sequences for phases. The program also could offer the user the beginning and the end of each phase as well as the duration of the transition period with more data.

Examination of samples of the site of Varamin, using Oxcal program, shows that this site wasresidential from about 3300-3600 BC and after a short transition period, had entered the early Bronz age period and settled in it up to 2700 BC, Had continued. Therefore, in addition to extracting an accurate chronological table for this site, the accuracy of primary stratigraphical information was also checked and confirmed with this program.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

پژوهه باستان‌سنجی ۱۴۰۰؛ ۷(۲): ۱۸۳-۱۹۵

پژوهه باستان‌سنجی

DOI: 10.52547/jra.7.2.183

URL: http://jra-tabriziau.ir/

یادداشت فنی

# هم‌سنجی رادیوکربن و تحلیل لایه‌نگاری در باستان‌شناسی با استفاده از برنامه OxCal

**سحر یزدانی*[۱]، نصیر اسکندری[۲]**

۱. دانشجوی دکترای باستان‌شناسی پیش از تاریخ، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۲.استادیار گروه باستان‌شناسی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

**تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۲۳** **تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۳۰**

## چکیده

در مطالعات باستان‌شناسی امروزی جهان، استفاده از گاهنگاری مطلق با روش سالیابی رادیوکربن یا کربن ۱۴ متداول است و حتی می‌تواند خطاهای ناشی از لایه‌نگاری نادُرست و لایه‌های مضطرب را برای کاوشگران تقلیل دهد. دقت اندازه‌گیری در این روش به‌شرط نمونه‌برداری صحیح بسیار بالا است و با پیشرفت علم و فنّاوری، نرم‌افزارهایی برای انجام محاسبات تخصصی و طولانی تبدیل و کالیبره کردن نتایج به سن تقویمی مورداستفاده باستان‌شناسان، به وجود آمدند. یکی از این نرم‌افزارها برنامه OxCal است که هم به‌صورت برخط و هم برون‌خط برای پژوهشگران قابل‌استفاده به نظر می‌رسد. در این نوشتار علاوه بر توضیح مختصری دربارهٔ روش انجام این سالیابی، به آموزش استفاده از این برنامه برای هم‌سنجی داده‌های تکی یا داده‌های فازهای متوالی، زیرفازها (فازهای هم‌جوار) و فازهای هم‌پوشان با ساده ترین روش ممکن و بدون نیاز به کدنویسی خواهیم پرداخت.

**واژگان کلیدی:** رادیوکربن، کربن ۱۴، OxCal، هم‌سنجی، طیف‌سنجی جرمی شتاب‌دهنده.

* نویسنده مسئول مکاتبات: گروه باستان‌شناسی، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه تهران

پست الکترونیکی: yazdani.sahar@ut.ac.ir

حق نشر متعلق به نویسنده(گان) است و نویسنده تحت مجوز Creative Commons Attribution License به مجله اجازه می‌دهد مقاله چاپ شده را با دیگران به اشتراک بگذارد منوط بر اینکه حقوق مؤلف اثر حفظ و به انتشار اولیه مقاله در این مجله اشاره شود.

## ۱. مقدمه

پایه و اساس مطالعات باستان‌شناسی، دانستن و درک توالی رویدادها و فعالیت‌هایی است که از مدارک و شواهد کاوش‌های باستان‌شناسان به دست می‌آید. روش‌های سالیابی و تاریخ‌گذاری متعددی در باستان-شناسی امروزی در جهان وجود دارد که به صورت مداوم در حال به روز شدن هستند. یکی از متداول‌ترین و محبوب‌ترین روش‌های گاهنگاری، تحلیل سالیابی رادیوکربن است که با نام کربن ۱۴ در کشور ما شناخته‌تر شده است.

رادیو کربن یا کربن ۱۴ یک ایزوتوپ ناپایدار (ایزوتوپ پرتوزا یا رادیواَکتیو) از عنصر کربن است (ایزوتوپ‌های پایدار کربن ۱۲ و ۱۳ هستند) و توسط مارتین کامن و سم روبن در دانشگاه کالیفرنیا، برکلی در سال ۱۹۴۰ میلادی کشف شد. اساس روش تاریخ‌گذاری یا سالیابی رادیوکربن، وجود کربن ۱۴ در مواد طبیعی است. این روش توسط ویلارد فرانک لیبی و همکارانش معرفی شد [1, 3,4].

کربن ۱۴ به طور مداوم با تأثیر نوترون‌های پرتوی کیهانی بر روی اتم‌های نیتروژن ۱۴ در جو بالایی شکل می‌گیرد و به‌سرعت در هوا اکسید می‌شود و دی اکسیدکربن ایجاد می‌کند و وارد چرخهٔ کربن جهانی می‌شود. گیاهان و جانوران در طول زندگی خود کربن ۱۴ را از دی‌اکسیدکربن جذب می‌کنند. هنگامی که آن‌ها می‌میرند، مبادلهٔ کربن را با زیست‌کُره یا بیوسفر متوقف می‌کنند و حجم کربن ۱۴ آن‌ها با سرعت تعیین شده که در قانون پوسیدگی رادیواکتیو وجود دارد، شروع به کاهش می‌کند (با نیمه‌عمر حدود ۵۷۳۰ سال). سالیابی رادیوکربن روشی است که اساساً برای اندازه‌گیری رادیواکتیویته باقیمانده طراحی شده است یعنی با اندازه‌گیری میزان ایزوتوپ کربن –۱۴ فعلی در بدن موجود مرده، می‌توانیم با درنظرگرفتن نیمه‌عمر این ایزوتوپ، زمان مرگ موجود را تخمین بزنیم [1]. دقت اندازه‌گیری در این روش، به‌شرط نمونه‌برداری صحیح، بسیار بالا است و در سال‌های اخیر نیز پیشرفت‌های زیادی برای حذف خطاها و استاندارد-سازی صورت پذیرفته است.

در مطالعات باستان‌شناسی امروزی در جهان، استفاده از گاهنگاری مطلق با این روش بسیار متداول است و حتی می‌تواند خطاهای ناشی از لایه‌نگاری نادرست و لایه‌های مضطرب را برای کاوشگران تقلیل دهد. یکی از مشکلاتی که تا دو دههٔ گذشته برای باستان‌شناسان وجود داشت، محاسبات طولانی و زمان‌بر برای تبدیل سن رادیوکربن به سن تقویمی مورد استفاده در این رشته و کالیبره کردن آن‌ها با استفاده از منحنی‌های هم‌سنجی و تحلیل‌های آماری بود. اما امروزه به لطف پیشرفت فنّاوری و تلاش دانشمندان، برنامه‌های نرم-افزاری به وجود آمدند که تنها با وارد کردن داده‌های آزمایشگاهی و در مدت چند ثانیه می‌توان همهٔ این محاسبات را انجام داد و سن تقویمی دقیق نمونه‌ها را به دست آورد.

در این نوشتار، علاوه بر توضیح مختصری از چگونگی انجام این سالیابی و محدودیت‌ها و استانداردهای لازم، به آموزش استفاده از نرم‌افزار OxCal جهت کالیبره کردن داده‌های آزمایش شده و محاسبهٔ سن تقویمی مورد استفاده در مطالعات باستان‌شناسی خواهیم پرداخت.

## ۲. سالیابی رادیوکربن

اندازه‌گیری رادیوکربن را به‌صورت قراردادی، سن رادیوکربن (CRA) می‌نامند [1].

این اندازه‌گیری، در ابتدا توسط دستگاه‌های شمارنده بتا صورت می‌گرفت که با شمارش تعداد بتاهای تشعشع یافته از اتم‌های کربن ۱۴ در حال پوسیدگی انجام می شد. روش جدید، طیف‌سنجی جرمی شتاب‌دهنده (AMS) نام دارد که تمام اتم‌های کربن ۱۴ نمونه را (بر خلاف روش قبل) شمارش می‌کند؛ بنابراین هم برای نمونه‌های کوچک‌تر قابل‌استفاده و هم جواب‌دهی آن سریع‌تر است [1-5].

محاسباتی که برای اندازه‌گیری انجام می‌شود به نوع فنّاوری مورداستفاده بستگی دارد. برای مشخص‌کردن

قدمت نمونه‌ای که با روش شمارش بتا آزمایش می شود باید نسبت اکتیوایی آن به اکتیوایی استاندارد مشخص شود. بدین منظور از یک نمونه که اکتیوایی آن برای ما مشخص است اندازه‌گیری صورت خواهد گرفت و با نمونهٔ اصلی مقایسه خواهد شد. رایج‌ترین نمونهٔ استاندارد اسید اکسالیک است که توسط مؤسسه ملی استاندارد و تکنولوژی(NIST) در سال ۱۹۷۷ میلادی تهیه شده است [6].

نتایجی که از روش AMS به دست می‌آیند در غالب نسبت‌های کربن ۱۲، کربن ۱۳ و کربن ۱۴ بیان می‌شوند [7]. در نتایج هر دو روش نیاز به اصلاحاتی در نسبت کربن ۱۴ به کربن ۱۲ است. به‌عنوان نمونه، بسیاری از فرایندهای شیمیایی تغییراتی را در نسبت‌های کربن ۱۴، کربن ۱۳ و کربن ۱۲ ایجاد می‌کنند. مثلاً فتوسنتز کربن ۱۳ را در مقایسه با کربن ۱۲ حدود ۱۸٪- کاهش می‌دهد و یا کربن موجود در آب دریاها آن را به ۷٪ افزایش می‌دهد [1]. اگر نمونه‌ای مقدار کمتری از نسبت کربن ۱۳ به ۱۲ در مقایسه با آنچه در جو موجود است را نشان بدهد، بنابراین منطقی است که انتظار داشته باشیم سن نمونه قدیمی‌تر از آنچه واقعاً هست، محاسبه شود.

بنابراین برای استاندارد کردن، انحراف مقدار کربن ۱۳ به کربن ۱۲ نسبت به مقدار پایه را در نظر گرفته و در گزارش‌ها به‌عنوان $\delta^{13}C$ با مقدار معمول ۲۵٪- گزارش می‌شود و بعد از انجام این اصلاحات، می‌توان قدمت رادیو کربن را از فرمول زیر محاسبه نمود:

$$Age = -\ln(Fm).8033 \text{ Years}$$

در این محاسبه از عمر میانگین (میانگین عمر اتم‌های متعدد یک هسته پرتوزاست که۱,۴۴۳ برابر نیمه‌عمر رادیواکتیو است) ۸۰۳۳ سال استفاده می‌شود که حاصل از ارزش نیمه‌عمر ۵۵۶۸ سال در محاسبات لیبی است نه مقدار دقیق نیمه‌عمر ۵۷۳۰ سال امروزی آن [7]! دلیل استفاده از مقدار لیبی در محاسبات تنها برای حفظ سازگاری با نتایج آزمایش رادیوکربن اولیه است و برای صحت سن تقویمی گزارش شده این مقدار در منحنی های هم‌سنجی اصلاح خواهد شد.

به‌طورکلی برای استانداردسازی بین‌المللی محاسبات سالیابی رادیو کربن رعایت موارد زیر ضروری است [1,5,8,9]:

۱- استفاده از نیمه‌عمر ۵۵۶۸ سال (استاندارد لیبی)

۲- درنظرگرفتن سال ۱۹۵۰ میلادی به‌عنوان زمان حاضر (0 BP). هم به دلیل اینکه از استاندارد لیبی که در سال ۱۹۴۹ آزمایش شده، استفاده می‌کنیم و هم به دلیل اینکه در دهه‌های ۱۹۶۰ و ۱۹۷۰ میلادی آزمایش کردن بمب‌های اتم صورت گرفت که سبب افزایش مقدار کربن ۱۴ در جو شد.

۳- اصلاحات شکنش ایزوتوپ ($\delta^{13}C$)

۴- استفاده از استاندارد اکسالیک اسید I یا II

۵- فرضیه ثابت ماندن مقدار کربن ۱۴ در خزانه تبادل کربن در طول زمان.

خطاهای استاندارد نیز در نتیجه سالیابی رادیوکربن گزارش می‌شوند، و با "±" نمایش داده می‌شوند. این مقادیر از طریق آماری به دست می‌آیند. در نواحی مختلف تغییرات نسبت کربن ۱۴ به کربن ۱۲ در نمونه مورد بررسی، حاکی از آن است که تخمین سن نمونه، صرفاً بر اساس تعداد کربن ۱۴ منجر به نتایج اشتباهی خواهد شد. عوامل دیگری نیز وجود دارد که منجر به بروز خطا خواهند شد و باید در نظر گرفته شوند، مانند:

۱ -نسبت متفاوت کربن ۱۴ به کربن ۱۲ در جو، هم از لحاظ جغرافیایی و هم از لحاظ زمانی. برای این نوع تغییرات در اصل سه عامل اصلی وجود دارد که شامل نوسانات در سرعت ایجاد کربن ۱۴، تغییرات ناشی از یخبندان، و تغییرات ناشی از فعالیت‌های انسان هستند [1,10].

۲ -شکنش ایزوتوپی

۳ -نسبت متفاوت کربن ۱۴ به کربن ۱۲ در قسمت‌های مختلف مخزن یا خزانه تبادل کربن. فرضیه اولیه لیبی این بود که این نسبت در سراسر جهان ثابت است اما اکنون می‌دانیم که چندین عامل برای تغییرات نسبت در خزانه تبادل وجود دارد که عبارت هستند از اثر

دریایی [1,8,10]، اثر آب سخت، آتشفشان‌ها، اثر جزایر و تأثیر نیمکره‌ها [1]. برای مثال نیمکره شمالی و جنوبی زمین سیستم گردش جوی مستقل از یکدیگر دارند. چون در نیمکرهٔ جنوبی سطح اقیانوس‌ها بیشتر است کربن ۱۴ بیشتری جذب اقیانوس‌ها می‌شود (اثر دریایی) و مقدار آن در هوا کاهش می‌یابد و در نتیجه نسبت کربن ۱۴ به کربن ۱۲ در نیمکره جنوبی کم‌تر از نیمکره شمالی خواهد بود (تأثیر نیمکره‌ها).

۴-آلودگی و عدم خلوص. این آلودگی زمانی اتفاق می افتد که نمونه در تماس نزدیک، یا در بسته‌بندی در مجاورت مواد دارای کربن مانند پنبه، خاکستر سیگار، برچسب‌های کاغذی و برخی از مواد شیمیایی مانند پلی وینیل استات قرار گیرد. این آلودگی حتی می‌تواند قبل از بسته‌بندی از طریق مواد آلی دارای کربن موجود در خاک بر روی نمونه اثر بگذارد.

## ۲-۱. هم سنجی

سالیابی رادیوکربن نمی‌تواند به طور مستقیم برای مطالعات باستان‌شناسی یا دیرین اقلیم‌شناسی، گاهنگاری مطلق معین کند؛ بلکه باید با استفاده از منحنی هم‌سنجی (برای جبران نوسانات جوی غلظت کربن۱۴) به سن تقویمی معادل آن تبدیل شود [11]. پارامترهایی که برای این اصلاحات به کار می‌روند از صدها نمونه سالیابی رادیو کربن بر روی حلقه درختانی که سن دقیق آن‌ها را می‌دانیم (درخت گاه‌شماری) گرفته شده‌اند [5].

هم‌سنجی مقیاس زمانی کربن ۱۴ در طول عمر کامل آن، در دهه‌های اخیر بسیار پیشرفت کرده است و تابه‌حال چندین مجموعه داده‌ای مستقل، از ۵۰ هزار سال کالیبره شده قبل از زمان حاضر نیز فراتر رفته‌اند و یک ساختار مشترک دقیق و بهبود روندهای کلی منحنی هم‌سنجی کربن ۱۴ را نشان می‌دهند [12].

این مدارک و اطلاعات از طریق دیتابیس‌های بین-المللی که مرتباً به‌روزرسانی می‌شوند (تقریباً هر ۵ سال با یک ورژن جدید) به دست می‌آیند. دیتا بیس‌های جهانی امروزی عبارت هستند از IntCal20 برای نیمکره شمالی [11]، ShCal20 برای نیمکرهٔ جنوبی [13] و Marine20 برای محیط‌های دریایی و اقیانوس‌ها [14].

هرچند که هنوز تفاوت‌هایی وجود دارد، امروزه نرم‌افزارهای متنوع و قابل‌اطمینانی عرضه شده‌اند که می‌توانیم محاسبات پیچیده هم‌سنجی و تحلیل بیزین [15] را در کوتاه‌ترین زمان، توسط آن‌ها انجام دهیم و ضریب اطمینان در محاسبه خطاها را بالاتر ببریم. ازجمله این برنامه‌ها OxCal [16]، BCal [17] و DateLab [18] هستند.

## ۲-۲. معرفی برنامه OxCal

استفاده از برنامه‌های هم‌سنجی رادیوکربن برای نشان‌دادن رابطهٔ بین کربن ۱۴ و تاریخ‌های تقویم، طی دهه‌های گذشته، کاملاً رایج شده است. اگر مدارک و نمونه‌های به‌دست‌آمده از محوطه‌های باستانی فاقد اطلاعات گاهنگاری نسبی و یا مقایسه‌ای در لایه-نگاری باشند، نیاز به استفاده از هم‌سنجی مستقیم دارند.

در بیشتر موارد، باستان‌شناس باید سایر اطلاعات مربوط به گاهنگاری را همراه با شواهدی از سالیابی کربن ۱۴ در نظر بگیرد. ارزیابی این اطلاعات یک عملیات پیچیده است که نیاز به مهارت و بینش قابل‌توجه باستان‌شناسی دارد. در طی دو دههٔ گذشته، برخی روش‌های جدید ریاضی برای نشان‌دادن کاربرد آمار در حل مسائل باستان‌شناسی به کار برده شده‌اند. یک مدل گاهنگاری برای محوطه (بر اساس لایه-نگاری و سایر شواهد مشابه) توسط باستان‌شناس طرح‌ریزی و با نتایج سالیابی کربن ۱۴ ترکیب می‌شود و از این طریق می‌توان اطلاعات زیادی را مانند تاریخ احتمالی یک رویداد، مدت‌زمان هر فاز اصلی یا زیر فاز و توالی آن‌ها استنباط کرد.

در سال ۱۹۹۵ میلادی برنامهٔ OxCal توسط کریستوفر برونک رمزی [16] تحت زبان C++ و با استفاده از روش‌های آماری و تئوری بیزین، برای کالیبره کردن سالیابی‌ها با منحنی‌های هم‌سنجی که از

مطالعات درخت گاه‌شماری نمونه‌هایی که سن آن‌ها را می‌دانیم و برخی از اصلاحاتی که برای تبدیل به سن تقویمی نیاز است مانند استفاده از منحنی IntCal، نوشته شد. از آن زمان به بعد نیز با توجه به آخرین اطلاعات دیتابیس‌های جهانی مرتباً به روزرسانی شده است.

این برنامه علاوه بر ارائهٔ هم‌سنجی سالیابی رادیوکربن، ابزاری برای تجزیه‌وتحلیل پس از حفاری نیز است. این برنامه شامل تسهیلاتی است که با داشتن اطلاعات لایه‌نگاری محوطه می‌تواند شروع و پایان هر فاز، دوره انتقالی، توالی و ... را به‌صورت جدول و نمودار در اختیار باستان‌شناسان قرار دهد. همچنین اگر اشتباهی در لایه‌نگاری صورت پذیرفته باشد در این تحلیل‌ها مشخص می‌شود.

برای استفاده از این برنامه به‌صورت برخط یا دانلود آن برای سیستم‌عامل‌های متفاوت، به این آدرس https://c14.arch.ox.ac.uk مراجعه کنید.

در این نوشتار ما به آموزش مقدماتی و کاربردی نرم‌افزار OxCal برای باستان‌شناسی خواهیم پرداخت. ازآنجاکه کشور ایران در نیمکرهٔ شمالی کرهٔ زمین قرار دارد از دیتابیس IntCal باید استفاده شود و چون IntCal20 ورژن جدیدی است که در سال ۲۰۲۰ میلادی منتشر شده، برای سهولت و مقایسه با سالیابی‌هایی که طی ۸ سال اخیر منتشر شده از ورژن قبلی IntCal13 [19] در این آموزش استفاده کرده‌ایم. داده‌هایی که در این آموزش و جدول ۱ استفاده شده، مربوط به محوطهٔ ورامین جیرفت است [20].

## ۳. آموزش OxCal ورژن ٤,٤

### ۳-۱-۱. نمونهٔ تکی (Single date plot)

برای کالیبره کردن تک نمونه، مطابق شکل ۱- الف، اسم نمونه و در ردیف دوم از کشوی سمت راست آن Date را انتخاب و مقدار کالیبره نشده آزمایشگاه را در ردیف دوم و سوم وارد کنید. گزینه Curve را بر روی Intcal 13 قرار دهید و سپس روی گزینه Calibrate کلیک کنید.

اکنون شما باید نمودار کالیبره شده نمونه خود را در سمت راست مشاهده کنید (شکل ۱- ب). در صورت نیاز به مشاهدهٔ جدول از منوی کشویی بالای نمودار، گزینه Table را انتخاب و برای مشاهدهٔ مجدد نمودار از همان منویی که Table را فعال کردید، گزینه Single Plot را انتخاب کنید (شکل ۱- ب و ج).

برای ذخیره کردن نمودار با فرمت png، گزینه File (شکل ۱- ب) و سپس Save as را انتخاب کنید. در نوار بالای صفحه، نام دلخواه خود را وارد و در قسمت Format گزینه png را انتخاب و روی گزینه Save کلیک کنید (شکل ۱- د).

شکل ذخیره شدهٔ نهایی، مطابق شکل ۲ خواهد بود.

### ۳-۱-۲. ایجاد توالی (creating Sequence)

ابتدا تمام داده‌های آزمایشگاهی خود را مطابق جدول ۱ و به ترتیبی که در ستون‌های عمودی مشاهده می کنید در اکسل وارد و فایل خود را ذخیره کنید. در برنامهٔ OxCal روی گزینه File کلیک و صفحه‌ای جدید با انتخاب New باز کنید. در صفحه جدید (شکل ۳- ب)، بر روی Tools کلیک کنید و Curve را از منوی کشویی زیر آن بر روی IntCal 13 قرار دهید. سپس Models را انتخاب و روی گزینه Sequences کلیک کنید. در این مرحله فرض ما بر این است اطلاعات لایه‌نگاری محوطه را در اختیار نداریم؛ بنابراین در قسمت Number of groups عدد ۱ را بنویسید و گزینه Contiguous را انتخاب و در انتها روی << مقابل Sequences کلیک کنید.

تب Import را انتخاب و در نوار کشویی بالای آن R-Date را انتخاب کنید. حال از فایل اکسلی که ذخیره کرده بودید تمام داده‌های جدولتان را copy و در محیط Oxcal در پنجره کوچک زردرنگ قسمت Imporet، paste کنید (شکل ۳- د). سپس در سمت راست صفحه روی نشانگر آبی‌رنگ زیر Sequence("1") کلیک و در سمت چپ صفحه روی << مقابل R-Date کلیک کنید. اگر تمام مراحل را درست انجام داده باشید اکنون همهٔ داده‌های شما در

زیر خط Sequence("1") باید وارد شده باشند (شکل ۳- ه).

داده‌هایی که در Import وارد کرده بودید، پاک کنید. Insert را انتخاب و R-Date را به Span تغییر دهید (قبل از تغییر، متن فیلدهای Name,14C Date,Uncertaintyرا پاک کنید) و در انتها بر روی << کلیک کنید. از منو view و سپس Startigraphic Model را انتخاب، سپس از تب File ، Run را انتخاب کنید (شکل ۳ و ۴).

### ۳-۱-۳. فازها (Phases)

بعد از تشکیل جدول اکسل، مانند مرحله قبلی صفحه جدیدی ایجاد کنید و بعد از انتخاب Tools، Curve را روی IntCal 13 قرار دهید (شکل ۳- الف و ب) و از گزینه Models، این بار Phases را انتخاب کنید. در قسمت Number of Phases تعداد فازهای نمونه‌های خود را وارد کنید (اگر داده‌های شما مربوط به یک دوره است برای مثال نوسنگی و اطلاعات لایه‌نگاری فاز یا زیرفاز را ندارید عدد ۱ را وارد کنید) و گزینه Contiguous را انتخاب و در انتها روی << مقابل Phases کلیک کنید (شکل ۵).

تب Import را انتخاب و در نوار کشویی بالای آن R-Date را انتخاب کنید. حال از فایل اکسلی که ذخیره کرده بودید تمام داده‌ها را copy و در محیط Oxcal در پنجره کوچک زردرنگ قسمت Imporet، paste کنید. سپس در سمت راست صفحه روی نشانگر آبی رنگ زیر ("1") Phases کلیک و در سمت چپ صفحه روی << مقابل R-Date کلیک کنید. اگر تمام مراحل را درست انجام داده باشید اکنون همه داده‌های شما باید در زیر خط ("1") Phases وارد شده باشند (شکل ۵- ج).

داده‌هایی که در Import وارد کرده بودید، پاک کنید. Insert را انتخاب و R-Date را به Span تغییر دهید (قبل از تغییر، متن فیلدهای Name,14C Date,Uncertainty را پاک کنید) و در انتها بر روی << کلیک و سپس از تب File، Run را انتخاب کنید.

اکنون برای مشاهدهٔ پلات و نمودار نهایی مطابق شکل ۶، گزینهٔ Multiple Plot را انتخاب کنید و برای دیدن پلات هر داده به‌صورت جداگانه، بعد از انتخاب Single Plot، با تغییر Page می‌توانید به آن‌ها دسترسی داشته باشید.

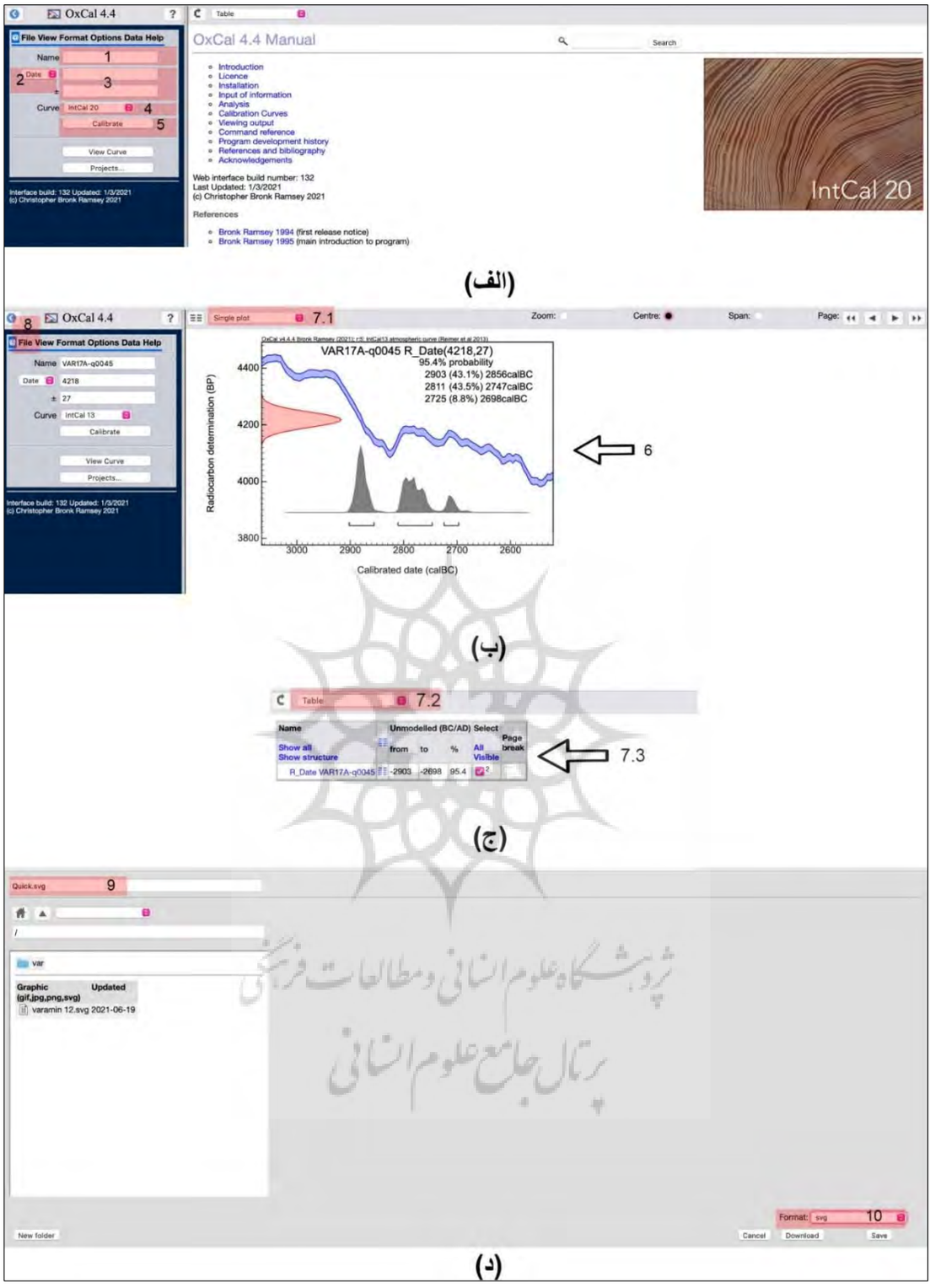
درصورتی‌که نیاز به تغییر تنظیمات نمایش‌داده‌شده Multiple Plot دارید، با انتخاب Format این امر امکان‌پذیر خواهد بود.

### ۳-۱-٤. فازهای هم‌جوار و زیرفازها (Contiguous Phases)

بعد از تشکیل جدول اکسل و صفحهٔ جدید و همچنین تنظیم Curve، از گزینه Models، Phases را انتخاب تعداد فازها را وارد و بعد از انتخاب Contiguous روی << مقابل Phases کلیک کنید. سپس از نوار منو روی View کلیک و Stratigraphic Model را انتخاب کنید. مانند مراحل قبلی داده‌های خود را در قسمت Import وارد کنید با این تفاوت که چون در این مرحله داده‌ها بیشتر از یک فاز یا زیر فاز هستند باید داده‌ها به ترتیب وارد شوند. برای این منظور قبل از paste کردن داده‌های هر فاز مطابق شکل ۷- الف روی نشانگر آبی رنگ زیر خط دستوری فاز آن کلیک کنید. سپس داده‌ها را در قسمت Import وارد و بر روی << کلیک کنید. سپس داده‌هایی که در صفحهٔ زردرنگ کوچک Import وارد کرده بودید پاک و مجدداً برای فاز بعدی با انتخاب نشانگر آبی‌رنگ مربوط به آن، مراحل ورود داده را تکرار کنید.

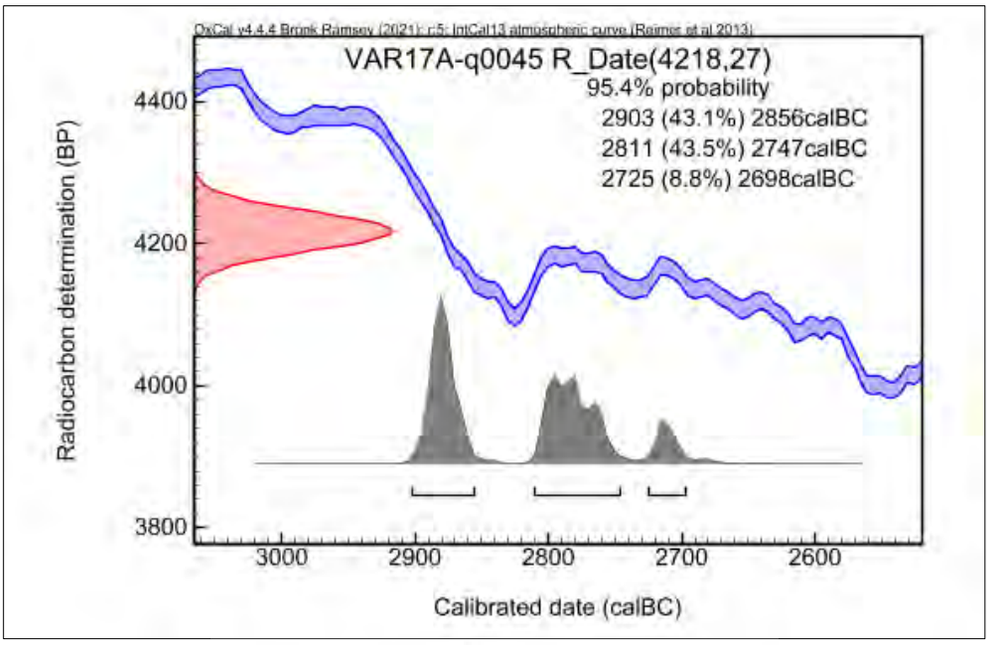
بعد از وارد کردن اطلاعات تمام فازها، Insert را انتخاب و R-Date را به Span تغییر دهید (قبل از تغییر، متن فیلدهای Name, 14C Date, Uncertainty را پاک کنید) و در انتها بر روی << کلیک کنید. در این مرحله چون بیشتر از ۱ فاز دارید، مرحله Span را برای هر فاز جداگانه و با انتخاب نشانگر آبی‌رنگ تکی مربوط به آن انجام دهید (شکل ۷- ب).

سپس از تب File، Run را انتخاب کنید.




شکل ۱: آموزش تصویری: نمونه تکی

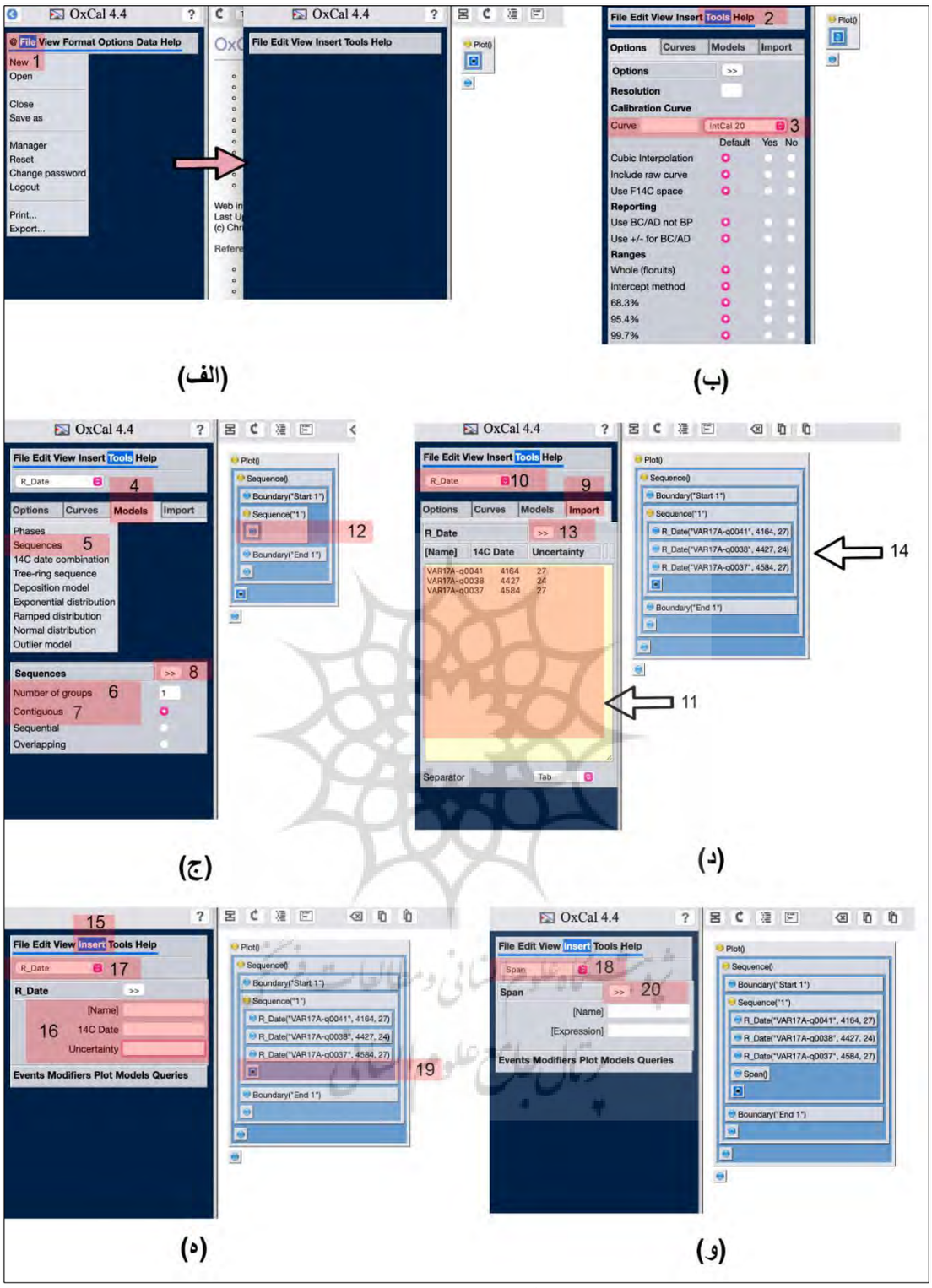
Fig. 1: step by step: entering single data




شکل ۲: خروجی نهایی منحنی هم‌سنجی یک داده
Fig. 2: Single data plot

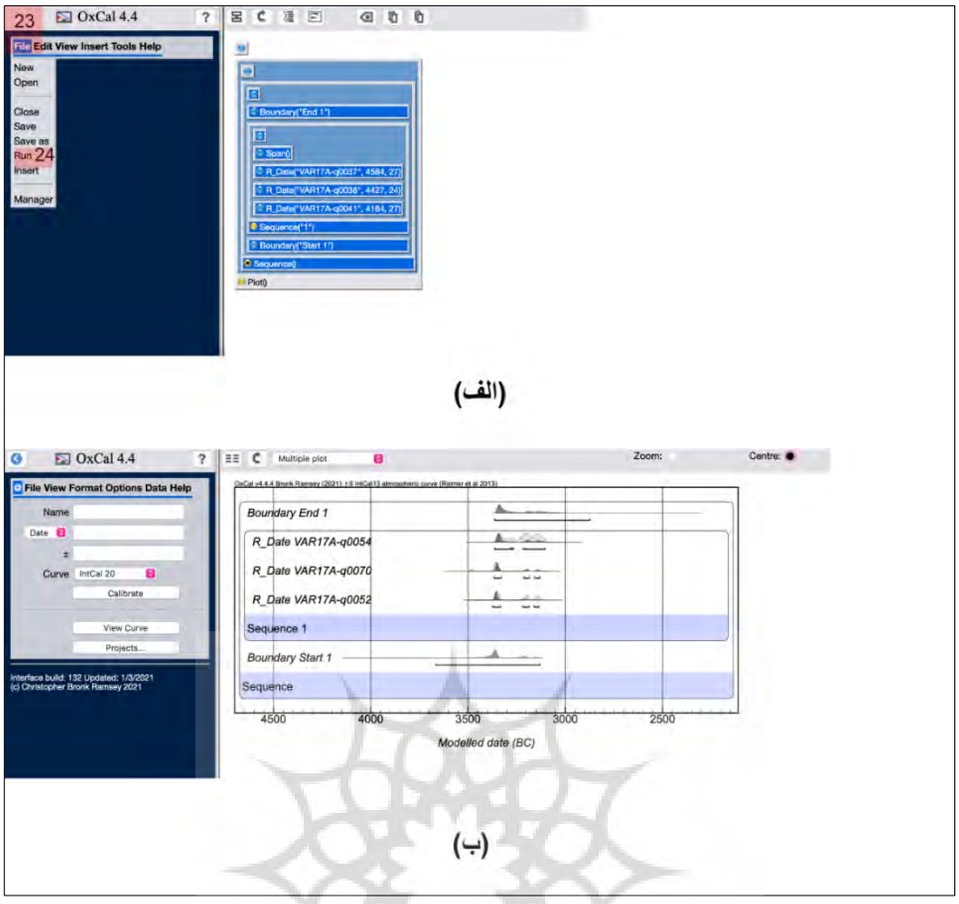
جدول ۱: نتایج رادیوکربن محوطه ورامین
Table 1: Uncalibrated C14 dating of Varamin

| Sample number | 14C Age [yr BP] | ± |
|---|---|---|
| VAR17A-q0045 | 4218 | 27 |
| VAR17A-q0041 | 4164 | 27 |
| VAR17A-q0038 | 4427 | 24 |
| VAR17A-q0037 | 4584 | 27 |
| VAR17A-q0052 | 4558 | 24 |
| VAR17A-q0054 | 4527 | 28 |
| VAR17A-q0067 | 4532 | 28 |
| VAR17A-q0070 | 4578 | 25 |
| VAR17A-q0064 | 4618 | 26 |
| VAR17A-q0079 | 4500 | 27 |
| VAR17A-q0071 | 4754 | 26 |
| VAR17A-q0078 | 4839 | 28 |




شکل ۳: آموزش تصویری: ایجاد توالی

Fig. 3:step by step: Creating sequence




شکل ۴: نتیجه نهایی مرحلهٔ ایجاد توالی
Fig. 4: Creating sequence multiple plot

### ۳-۱-۵. فازهای متوالی (Sequential Phases)

مانند مراحل قبلی، بعد از تشکیل جدول اکسل و صفحهٔ جدید و همچنین تنظیم Curve، و انتخاب Phases، تعداد فازها را وارد و سپس Sequential را انتخاب و روی << مقابل Phases کلیک کنید. داده‌های هر فاز را به ترتیبی که قبلاً ذکر شد برای هر فاز در قسمت Import وارد کنید و در پایان هر مرحله کلیک کردن بر روی << را فراموش نکنید. مرحله Span را برای هر فاز تکرار و قبل از Run کردن نهایی پروژه، از گزینه View، Stratigraphic Model را انتخاب کنید.

### ۳-۱-۶. فازهای هم پوشان (Overlaping Phases)

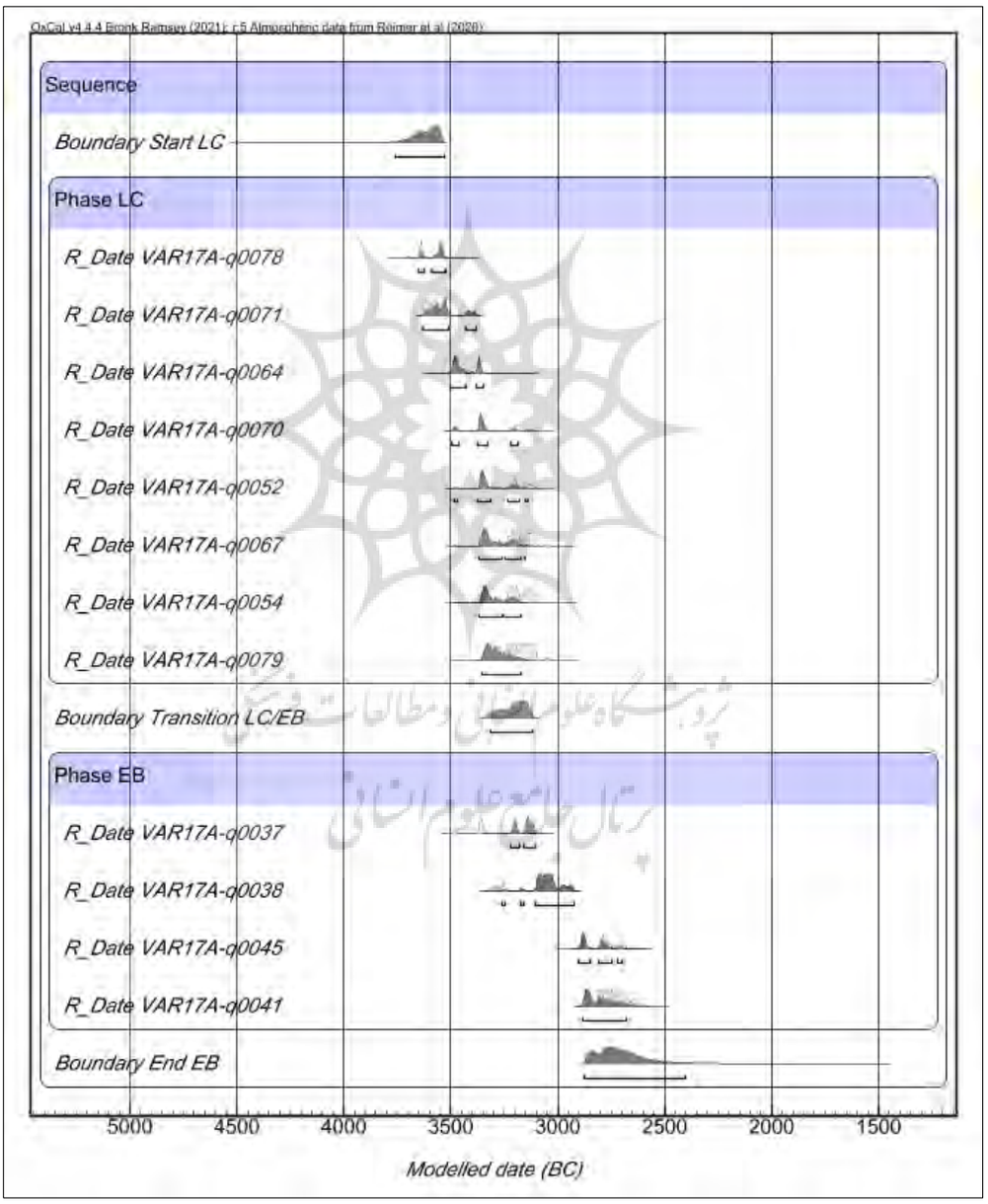
اگر فازها با هم به‌جای توالی، هم‌پوشانی دارند، بعد از انتخاب Phases و وارد کردن تعداد، این بار گزینه Overlaping را انتخاب و در انتها بر روی << کلیک کنید و سپس تمامی مراحل قبلی را برای این مرحله تکرار کنید با این تفاوت که نیازی به انتخاب Stratigraphic Model از View نیست.

## ۳-۲. نتایج کاربردی OxCal برای محوطهٔ ورامین

برای یک نمونه کاربردی از این برنامه، باتوجه‌به توضیحات ذکر شده، می‌خواهیم بدانیم که برای داده‌های محوطه ورامین جیرفت که توسط یکی از نگارندگان نوشتار حاضر کاوش شده است [۲۰]، چگونه هم‌سنجی و آنالیز انجام دهیم؟ این محوطه توسط کاوشگر آن لایه‌نگاری شده و شامل دو دوره است و ۱۲ نمونه از ۸ لایهٔ متفاوت آن، آزمایش رادیوکربن شده‌اند. با توجه به اطلاعات لایه‌نگاری، می‌دانیم که

این محوطه در دورهٔ مس و سنگ جدید و مفرغ قدیم پیوسته مورداستفاده بوده است و باید شاهد دورهٔ گذار مس و سنگ جدید به مفرغ جیرفت در این محوطه باشیم؛ بنابراین، برای داده‌های این محوطه از آنالیز فازهای هم‌جوار استفاده و در قسمت Number of Phases عدد ۲ را وارد می‌کنیم. نمودار نهایی (شکل ۸) نشان می‌دهد که دوره مس و سنگ جدید این محوطه ۳۶۰۰–۳۳۰۰ ق.م بوده و پس از یک دورهٔ گذار حدوداً ۱۰۰ ساله، به دوره مفرغ قدیم وارد شده که تا ۲۷۰۰ ق.م ادامه داشته است. علاوه بر این، این نمودار به‌روشنی نشان‌دهندهٔ صحیح بودن لایه‌نگاری است.

در نتیجه، به همین سادگی می‌توانیم هم نتایج را کالیبره کنیم و هم آنالیزی از دوره‌های محوطه داشته باشیم و در آخر نیز از صحت لایه‌نگاری مطمئن شویم.




شکل ۸: نتایج رادیوکربن کالیبره شدهٔ محوطهٔ ورامین
Fig. 8: Calibrated C14 dating of Varamin

## ٤. نتیجه‌گیری

اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی بر روی یک نمونه یک سن را مشخص می‌کنند که این سن تنها نشان‌دهندهٔ سن رادیو کربن نمونه است و به دلیل استفاده از استانداردهایی مانند استاندارد لیبی در آزمایش رادیوکربن نیاز به اصلاحاتی برای تبدیل نتیجه به‌دست‌آمده به یک گاهنگاری دقیق و محاسبهٔ سن تقویمی است؛ بنابراین با استفاده از منحنی‌های هم-سنجی بر اساس نمونه‌های سنی شناخته شده (عمدتاً درخت گاه‌شماری) و نیز استفاده از تحلیل‌های آماری، سن تقویمی به دست می‌آید. از سوی دیگر برای به‌دست‌آوردن منحنی هم‌سنجی باید ملاحظاتی مانند تأثیر نیمکره‌ها و یا اثر دریایی را نیز در نظر گرفت.

برای به‌دست‌آوردن منحنی هم‌سنجی و محاسبهٔ سن تقویمی در نیمکرهٔ شمالی از منحنی به نام IntCal استفاده می‌شود که از سال ۱۹۹۸ میلادی به جهان معرفی شد و آخرین به‌روزرسانی این منحنی IntCal 20 نام دارد. برنامه‌های نرم‌افزاری که به‌مرور به دنیای علم معرفی شدند محاسبات طولانی و پیچیده به‌دست‌آوردن سن تقویمی را بسیار کوتاه کردند و با داشتن نتایج رادیوکربن و واردکردن آن‌ها در این برنامه‌ها در کسری از ثانیه محاسبات انجام می‌پذیرند. یکی از این برنامه‌ها OxCal بود که در این نوشتار به آموزش استفاده از آن پرداختیم. علاوه بر محیط کاربری بسیار ساده و آسان، این برنامه قابلیت آنالیز داده‌ها و ساخت توالی برای فازها را دارد. همچنین این برنامه توانایی آن را دارد تا با داشتن تعداد بیشتری از داده، شروع و پایان هر فاز و نیز دوره گذار را نیز به کاربر پیشنهاد دهد. در مجموع این برنامه، پژوهشگرانی را که نیاز به دانستن سن تقویمی و کالیبره شده داده-های خود از یک محوطه یا چندین محوطه دارند، از انجام محاسبات طولانی و تخصصی و یا دانستن آخرین اطلاعات دیتابیس‌های جهانی مورداستفاده بی-نیاز می‌کند. در واقع تمام آن چیزی که یک پژوهشگر لازم دارد، داشتن نتایج رادیو کربن و سپس واردکردن آن‌ها در این برنامه و مشخص‌کردن آنالیز موردنظر خواهد بود.

بررسی نمونه‌های محوطه ورامین جیرفت با استفاده از برنامه Oxcal، نشان می‌دهد که این محوطه از حدود ۳۶۰۰–۳۳۰۰ ق.م مسکونی بوده و پس از یک دوره گذار حدوداً ۱۰۰ ساله، وارد دورهٔ مفرغ قدیم شده است و استقرار در آن تا ۲۷۰۰ ق.م ادامه داشته است. بنابراین علاوه بر استخراج جدول گاه‌نگاری دقیق برای این محوطه، صحت اصلاعات لایه نگاری هنگام کاوش نیز با این برنامه مورد بررسی و تأیید قرار گرفت.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

**References**


[1] Bowman S. Radiocarbon Dating. London: British Museum Press, 1995.

[2] Kamen MD. Early History of Carbon-14: Discovery of this supremely important tracer was expected in the physical sense but not in the chemical sense. Science. 1943; 140 (3567): 584–590

[3] Anderson EC, Libby WF, Weinhouse S, Reid AF, Kirshenbaum AD, Grosse AV. Radiocarbon from cosmic radiation. Science. 1947; 105 (2765): 576–577

[4] Laylin JK. Nobel Laureates in Chemistry, 1901–1992. Washington: American Chemical Society, 1993.

[5] Aitken MJ. Science-based Dating in Archaeology. London: Longman, 1990. ISBN 978-0-582-49309-4.

[6] Terasmae J. Radiocarbon dating: some problems and potential developments. In: Mahaney WC, editor. Quaternary Dating Methods. Amsterdam: Elsevier, 1984; p. 1–15. ISBN 978-0-444-42392-4.

[7] McNichol AP, Jull ATS, Burr GS. Converting AMS data to radiocarbon values: considerations and conventions. Radiocarbon. 2001; 43

(2A): 313–320. doi:10.1017/S0033822200038169

[8] Libby WF. Radiocarbon Dating. Chicago: Phoenix; 1965.

[9] Maslin MA, Swann GEA. Isotopes in marine sediments. In: Leng MJ, editor. Isotopes in Palaeoenvironmental Research. Dordrecht: Springer, 2006; p.227–290. doi:10.1007/1-4020-2504-1_06.

[10] Russell N. Marine radiocarbon reservoir effects (MRE) in archaeology: temporal and spatial changes through the Holocene within the UK coastal environment [unpublished dissertation]. Glasgow, Scotland; 2011.

[11] Reimer P, Austin W, Bard E, Bayliss A, Blackwell P, Bronk Ramsey C, et al. The IntCal20 Northern Hemisphere radiocarbon age calibration curve (0–55 cal kBP). Radiocarbon.2020; 62(4): 725-757. doi:10.1017/RDC.2020.41

[12] Hughen K, Heaton T. Updated Cariaco Basin 14C Calibration Dataset from 0–60 cal kyr BP. Radiocarbon. 2020; 62(4): 1001-1043. doi:10.1017/RDC.2020.53

[13] Hogg A, Heaton T, Hua Q, Palmer J, Turney C, Southon J, et al. SHCal20 Southern Hemisphere Calibration, 0–55,000 Years cal BP. Radiocarbon. 2020; 62(4): 759-778. doi:10.1017/RDC.2020.59

[14] Heaton T, Köhler P, Butzin M, Bard E, Reimer R, Austin W, et al. Marine20—The Marine Radiocarbon Age Calibration Curve (0–55,000 cal BP). Radiocarbon. 2020; 62(4): 779-820. doi:10.1017/RDC.2020.68

[15] Bronk Ramsey C. Bayesian Analysis of Radiocarbon Dates. Radiocarbon. 2009; 51(1): 337-360. doi:10.1017/S0033822200033865

[16] Bronk Ramsey C. Radiocarbon Calibration and Analysis of Stratigraphy: The OxCal Program. Radiocarbon. 1995; 37(2): 425-430. doi:10.1017/S0033822200030903

[17] Buck CE, Christen JA, James GN. BCal: an on-line Bayesian radiocarbon calibration tool. Internet Archaeology.1999; 7(7).

[18] Jones M, Nicholls G. New radiocarbon calibration software. Radiocarbon. 2002; 44(3): 663–674.

[19] Reimer PJ, Bard E, Bayliss A, Beck JW, Blackwell PG, Bronk Ramsey C, et al. IntCal13 and Marine13 Radiocarbon Age Calibration Curves 0-50,000 Years cal BP. Radiocarbon. 2013; 55(4): 1869–1887.

[20] Eskandari N. The Results of the Archaeological Investigations at the Site of Varamin, Jiroft: Early Phase of Jiroft Civilization. Parseh J Archaeol Stud. 2020; 4 (13) :27-53 doi: 10.30699/PJAS.4.13.27 [in Persian]

[اسکندری نصیر. نتایج پروژه پیش ازتاریخی محوطه ورامین: معرفی مرحله اولیه تمدن جیرفت. مطالعات باستان شناسی پارسه. ۱۳۹۹ ؛۱۳: ۲۷-۵۳.]