تعیین سن زمین‌شناسی به‌روش رادیوکربن

Radiocarbon Geochronology

شیوا عقبایی*

چکیده

امروزه دانشمندان علوم زمین، بدون بهره‌گیری از روش‌های دستگاهی سن‌سنجی، قادر به تشریح تاریخ زمین و تعیین سن آن نیستند و این مهم فراهم نمی‌آید، مگر با شناخت کافی از موقعیت نمونه‌ی مورد نظر و چگونگی ارتباط آن با محیط زمین‌شناسی پیرامون. نیاز ناگزیر انسان به شناخت تاریخی رخدادهای طبیعی، در راستای داشتن تصویری روشن‌تر از آینده‌ی پیش‌رو، سبب توسعه و گسترش روزافزون دانش در زمینه‌ی علوم پایه و مشارکت بیش از پیش پژوهشگران شاخه‌های گوناگون علوم، از جمله پژوهشگران دانش ژئوکرونولوژی[1]، در شناخت بهتر رخدادهای دو میلیون ساله‌ی اخیر زمین شده است. یکی از مهم‌ترین و قابل توجه‌ترین این تبادل داده‌های علمی، به‌کارگیری روش‌های تعیین سن مطلق در راستای به‌تقویم کشیدن رویدادهای طبیعی است. امروزه روش‌های تعیین سن بسیاری، توسط دانشمندان کواترنری‌شناس به‌کار گرفته شده‌اند که از آن میان، روش سن‌سنجی کربن ۱۴ با نیمه عمری برابر ۵۷۳۹ سال و گستره‌ی زمانی کاربری نزدیک به ۵۵ هزار سال، از مهم‌ترین و دقیق‌ترین این روش‌های سن‌سنجی به‌شمار می‌رود.

مقدمه

بنیان تعیین سن با استفاده از ایزوتوپ‌های کربن، براساس متلاشی شدن رادیواکتیو ^{14}C (با نیمه عمری برابر با ۵۷۳۰ سال) به اتم ^{14}N استوار است که بر اثر کنش و واکنش ذرات کیهانی با نیتروژن و اکسیژن موجود در جو تولید می‌شود. از پیشگامان سنجش میزان کربن ۱۴ در طبیعت، می‌توان از لیبی[2] و همکاران او از دانشگاه شیکاگو نام برد که پژوهش خود را در اواخر دهه‌ی ۴۰ میلادی، روی ایزوتوپ‌های کربن آغاز کردند. وی کم‌تر از ۲۰ سال بعد و در سال ۱۹۶۰، به‌سبب گسترش و توسعه‌ی روش سن‌یابی با کربن، برنده‌ی جایزه‌ی نوبل شیمی شد [Noller and others, 2000]. اکنون با گذشت ۴۰ سال از آغاز پژوهش‌هایی از این دست، رادیوکربن به یکی از کاربردی‌ترین ابزار سن‌یابی در پژوهش‌های باستان‌شناسی، دیرینه هواشناسی و دیرینه لرزه‌شناسی تبدیل شده است.

افزون بر اهمیت رادیوکربن‌ها به‌عنوان ابزار سن‌یابی کاربردی، از رادیوکربن به عنوان یکی از مهم‌ترین ابزار شناخت چرخه‌ی کربن در زمین نیز یاد می‌شود. نسبت تبادل کربنی بین هواکره، اقیانوس و زیست‌کره، با میزان و پراکنش آن در طبیعت به‌شدت متناسب است.

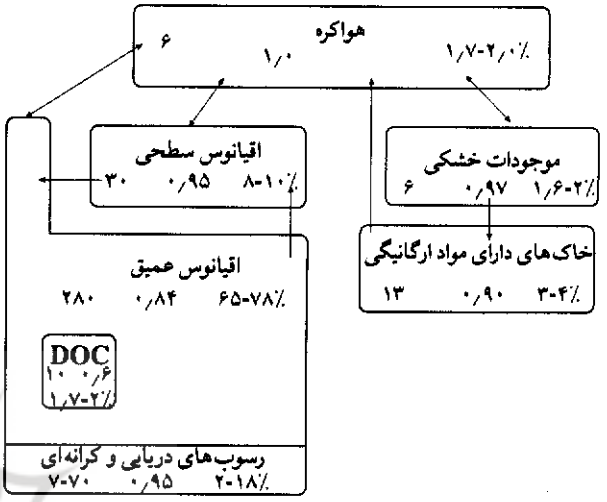
بالا رفتن حساسیت روش‌های اندازه‌گیری، گسترش و پیشرفت طیف‌سنج‌ها و شتابدهنده‌های Accelerator Mass Spectrometry (AMS) در ۲۰ سال گذشته، سبب کاربرد مفید و گسترده‌ی این روش در پژوهش و کاربرد روش سن‌یابی کربن ۱۴ در دیرینه لرزه‌شناسی شده است که بیش‌تر متمرکز بر تعیین سن ریخت‌های زمین‌شناختی شکل گرفته در هنگام زمین‌لرزه‌هاست و ضمن تلفیق با دیگر داده‌های زمین‌شناختی و تاریخی می‌تواند، راهنمایی بر زمان بازگشت زمین‌لرزه‌های بزرگ باشد [Mc Calpin, 1996].

تئوری و روش

کربن سه ماهیت ایزوتوپی شناخته شده دارد. دو ایزوتوپ ۱۲ (۹۸/۸۹٪) و ۱۳ (۱/۱۱٪) و رادیوکربن که با نسبتی کم‌تر از 10^{-10} درصد، به‌شدت ناپایدار است و به ذرات β و نیتروژن ۱۴ در نیمه عمری برابر با ۵۷۳۹ سال تبدیل می‌شود. اتم‌های رادیوکربن که به‌طور ثابت بر اثر بمباران اتم‌های نیتروژن و اکسیژن با اشعه‌های کیهانی در لایه‌های بالایی اتمسفر تولید می‌شوند، گرچه به میزان بسیار ناچیزی در سنگ‌های سطحی زمین قابل مشاهده‌اند، بیش‌تر در قالب ^{14}N و ^{12}C فقط در سطح

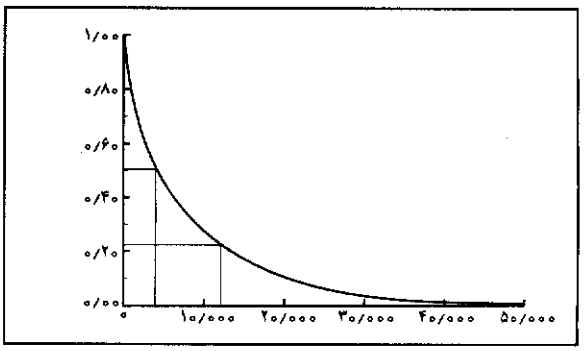
زمین وجود دارند [Noller and others, 2000] .

نرخ تولید کربن ۱۴ در جهان نزدیک به $2cm^{-2/S}$ اتم است که به طور کلی، ۷۵ درصد از این مقدار در استراتوسفر و بقیه در توپوسفر شکل می گیرد و در مدت چند ساعت به ^{14}CO اکسیده می شود. تبادل سریع نسبت کربنی بین اتمسفر و بیوسفر به گیاهان، اجازه‌ی جذب ^{14}C را با نرخی برابر با آنچه در اتمسفر وجود دارد، فراهم می آورد (نمودار ۱).



نمودار ۱. پراکنش کربن $^{13}C/^{12}C$ نمونه به نرخ کربن $^{13}C/^{12}C$ در اتمسفر (برگرفته از: نولر و همکاران، ۲۰۰۰).

فعالیت کربن ۱۴ در گیاهان با طول عمر بالا، همچون اجزای چوبی درختان، نسبت به گیاهان با طول عمر کوتاه، چون برگ ها، دانه ها و ریشه ها، کم تر است. سرعت متلاشی شدن در چرخه‌ی کربن پس از مرگ موجود زنده، طولانی تر از زمان تبادل مستقیم یا غیرمستقیم Co_2 اتمسفر و متلاشی شدن آن به ^{14}N نیست و اگر کالبد موجود زنده به دلایلی از متلاشی شدن بازماند، میزان نسبی ^{14}C در برابر میزان آن در بدن موجود زنده کاهش خواهد یافت و این همان اساس تعیین سن به روش رادیوکربن است (نمودار ۲).



نمودار ۲. کاهش میزان رادیوکربن در طول زمان (برگرفته از: نولر و همکاران، ۲۰۰۰).

سن یابی با این روش نیازمند محاسبه‌ی مقدار واقعی ^{14}C در بازمانده‌ی گیاهی و یا حیوانی است که برابر با میزان Co_2 اتمسفر در عصر پیش از روزگار صنعتی بوده است. با این حال، در این زمینه همچنان دو مشکل اساسی باقی است:

۱. به سبب فعالیت های فتوسنتز در طبیعت، نرخ واکنش های شیمیایی و بیولوژی و نسبت تلاشی ایزوتوپی $^{13}C/^{12}C$ در Co_2 موجود در هواکره، متفاوت از کربن ثابت در اتمسفر اولیه است.

۲. میزان کربن ۱۴ اتمسفر در طی زمان، به سبب تغییر در نسبت تولید ^{14}C و تغییرات میزان پراکنش کربن در اقیانوس ها، بیوسفر و اتمسفر، ثابت نیست [Noller and others, 2000].

بازه این تغییرات، براساس ^{14}C موجود در سلولز تعیین سن شده‌ی حلقه های سالیانه‌ی رشد درختان قابل محاسبه است که معمولاً کم تر از ۱۰ درصد برای نمونه هایی در ردیف سنی حدود هفت هزار سال، و نزدیک به ۳۰ درصد برای نمونه هایی با سن بیش از ۱۳۰/۰۰۰ سال درنظر گرفته می شود [Bard and others, 1990]. فاکتور تصحیحات سن تقویمی کربن (کالیبراسیون کربن ۱۴) براساس اندازه گیری میزان ^{14}C مستقل در حلقه های سلولزی سالیانه‌ی درختان، ماکروفسیل ها، ریزچینه های نهشته های دریاچه ای و پادگانه های مرجانی محاسبه شده است.

[Noller and others; Stuiver and others, 1993]

جدیدترین این تغییرات در میزان کربن ۱۴ موجود در CO_2 اتمسفر، حاصل رهایی ^{14}C آزاد شده از مولکول های دارای کربن، درنتیجه‌ی استفاده‌ی روزافزون از سوخت های فسیلی است.

گستره‌ی کاربرد

کربن ۱۴، در سن یابی تمامی مواد زنده با کربن ثابت حاصل از فتوسنتز در گستره‌ی زمانی ۶۰/۰۰۰-۵۰/۰۰۰ سال، قابل کاربری است. البته به دلایلی چند، این روش دارای محدودیت هایی نیز هست؛ از جمله:

۱. تغییرات میزان کربن ۱۴ در مولکول CO_2 اتمسفر در گذشته (نمودارهای ۵-۳).

۲. آلایش و افزایش میزان کربن بر اثر میزان کربن موجود در گذشته.

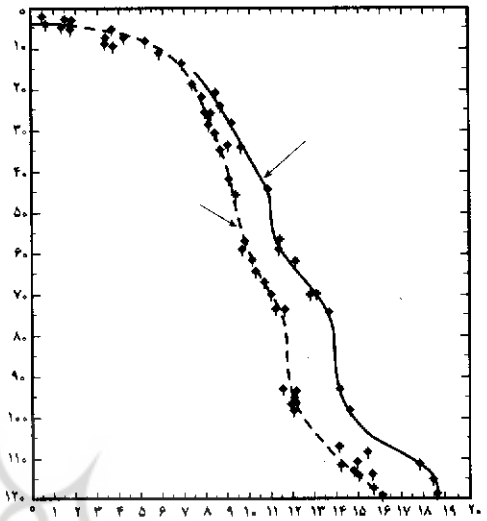
۳. آلودگی نمونه ها هنگام نمونه برداری در صحرا.

از این رو، با توجه به محدودیت های یاد شده، پژوهشگران اندازه گیری های رادیوکربن را برای نمونه هایی در گستره‌ی زمانی بین ۴۰-۲۰BP و ۷۰/۰۰۰BP، مفیدتر و قابل اطمینان تر دانسته اند. در عمل، گستره‌ی سنی قابل کاربرد، محدود در بازه‌ی زمانی بین ۳۰۰ تا ۵۵۰۰۰ می شود [Noller and others, 2000]. اندازه گیری

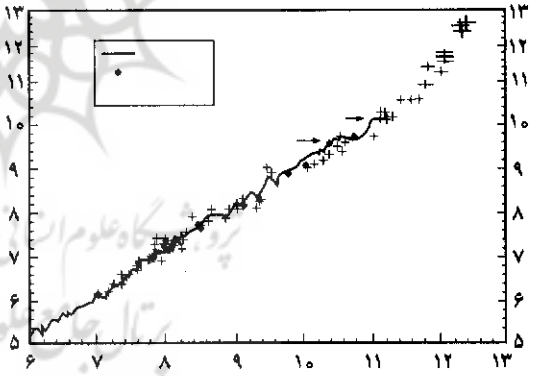
میزان تغییرات رادیوکربن و کالیبره کردن مقادیر محاسبه شده، قابلیت تبدیل سن تقویمی ^{14}C و سن کالیبره ^{14}C را در آرایه‌ای دوسویه فراهم می‌آورد:

(BP: پیش از ۱۹۵۰ AD، BC: پیش از تولد مسیح، و AD: پس از تولد مسیح ـ نمودارهای ۴ و ۶).

$$Cal\ BP = 1950 - Cal\ AD \qquad Cal\ BP = Cal\ BC + 1950$$



نمودار ۳. مقایسه‌ی سن به‌دست آمده براساس روش U/Th و ^{14}C روی تراس‌های مرجانی جزایر برمودا (برگرفته از: نولر و همکاران، ۲۰۰۰).

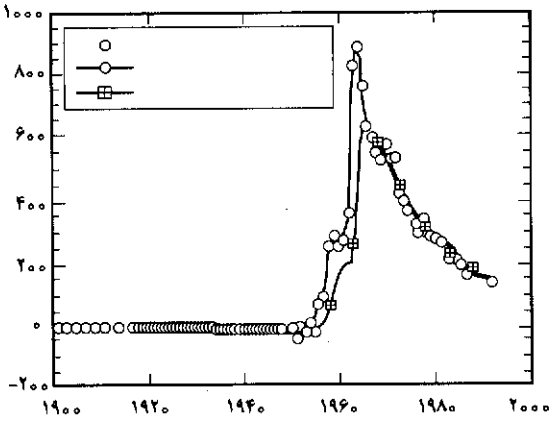


نمودار ۴. مقایسه‌ی سن به‌دست آمده از روی حلقه‌ی درختان و ریزچینه‌های دریاچه‌ای سوئیس برای بازه زمانی **6000-12000BP** سال (برگرفته از: نولر و همکاران، ۲۰۰۰).

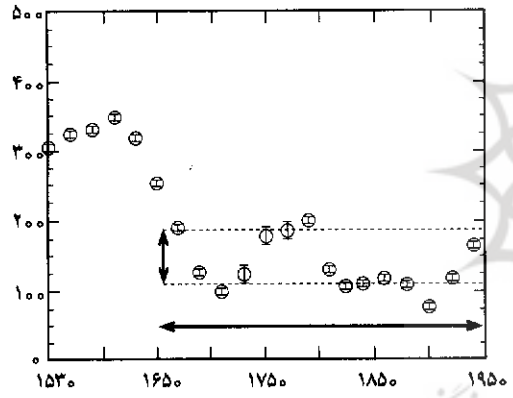
مرجع زمانی کالیبراسیون سن‌یابی با کربن ۱۴، سال ۱۹۵۰AD پذیرفته شده است. در این‌جا، نسبت تفاوت سن کالیبره و تقویمی کربن ناشی از مدت زمان شکل‌گیری نمونه، موردنظر است. دو روش شناخته شده و متفاوت برای اندازه‌گیری میزان رادیوکربن موجود در مواد ارگانیک عبارتند از:

۱. اندازه‌گیری نرخ تلاشی ^{14}C در نمونه‌ها، با اندازه‌گیری مقادیر آن در مولکول‌های CO_2، CH_4، C_2H_2، بنزن مایع، و به‌ندرت C_2H_6.

۲. روش طیف‌سنجی AMS که از سال ۱۹۷۷ میلادی با گسترش و توسعه‌ی دستگاه‌های شتاب‌دهنده به‌کار گرفته شده است.



نمودار ۵. تغییرات میزان کربن ۱۴ اتمسفر در دوره‌ی تاریخی ۱۹۰۰ تا ۱۹۸۰ میلادی (برگرفته از: نولر و همکاران، ۲۰۰۰).



نمودار ۶. سن تقویمی رادیوکربن به‌دست آمده از روی ^{14}C موجود در حلقه‌های سالیانه کهن‌تر از ۴۰۰ سال درخت. نشانگر گستره‌ی سن کالیبره‌ی احتمالی، AD ۱۹۵۰-۱۶۵۰ با خطای ۴۰ ± ۱۵۰ سال (برگرفته از: نولر و همکاران، ۲۰۰۰).

ویژگی‌های نمونه‌ی قابل کاربرد

نمونه‌ی قابل کاربرد با روش رادیوکربن، باید افزون بر داشتن کربن ثابت حاصل از Co_2 اتمسفر، دارای رابطه‌ی روشنی بین جایگاه زمین‌شناختی آن و رخداد موردنظر برای سن‌یابی نیز باشد. برای مثال، موادی چون چوب، دانه، هاگ، ذغال، استخوان، خاک‌های آلی و ذرات کربناته‌ی پوسته‌ی دوکفه‌ای‌ها، از جمله مواد مناسب کاربرد در این روش هستند.

چوب[۳]: از چوب‌ها معمولاً به عنوان مواد ایده‌آل برای تعیین سن رادیوکربن یاد می‌شود؛ چرا که چوب به طور مستقیم

نشانگر زمان $Co_{\circ}$ ثابت در اتمسفر است. چوب درختان با توانایی حیات بیش از یک صدسال، از جمله بهترین شاخص‌های اندازه‌گیری تغییرات آب و هوایی در زمان رشد و نمو درخت است.

ماکروفسیل‌ها[4]: برگ‌ها، دانه‌ها، ریشه‌ها، هاگ و فیتولیت‌ها، از جمله مواد دارای دوره‌ی حیات کوتاه هستند که طی یک یا چند سال شکل می‌گیرند و نابود می‌شوند. فیتولیت‌ها نیز که ذرات میکروسکپی کلوئیدی تشکیل شده بین دیواره‌ی سلولی گیاه (بیش‌تر گیاهان علفی) هستند، همچون هاگ‌ها و دانه‌ها در محیط‌های زمین‌شناسی از تجمع قابل‌توجهی برخوردارند و قابل تعیین سن هستند؛ گرچه در مقایسه با نهشته‌های شامل ریشه و برگ گیاهان که در عمل کار با آن‌ها مطمئن‌تر و ساده‌تر است، از کاربری محدودتری برخوردارند.

ذغال چوب[5]: چوب‌ها، دانه‌ها و استخوان‌ها، از جمله ترکیبات بسیار مناسب با ذخیره‌ی قابل توجه کربن برای تعیین سن به‌حساب می‌آیند. از این میان، ذرات ذغال چوب، هرچند که می‌توانند شامل ذراتی از مواد آواری و نابرجا نیز باشند، از مناسب‌ترین مواد قابل سن‌یابی به‌شمار می‌روند.

استخوان[6]: استخوان‌ها، به‌سبب داشتن فضاهای خالی، به‌سادگی کربن موجود در خاک و آب‌های زیرزمینی را می‌پذیرند. معمولاً استخوان‌هایی با ذخیره‌ای درخور از کربن، به‌سادگی قابل تعیین سن هستند.

خاک‌های آلی[7]: خاک‌های آلی، حاصل تجمع ماکروفسیل‌های قابل مشاهده و مناسب سن‌یابی، همچون دانه‌ها، برگ‌ها، هاگ‌ها و میوه‌ی گیاهان هستند که باید به‌دقت از ریشه‌های گیاهان عهد حاضر جداسازی شوند. خاک‌های انباشته از مواد آلی نهشته‌های دریاچه‌ای و یا تالاب‌ها، از جمله ذخایر قابل توجه این گونه خاک‌ها محسوب می‌شوند.

دیرینه خاک[8]: این گونه خاک‌ها اغلب حاوی ذرات ماکروفسیلی شامل کربن قابل تعیین سن هستند. دیرینه‌ی خاک‌ها، در اعماق آبرفت‌های گاه ستبر نهشته‌هایی با سن ۱ تا ۱/۵ میلیون سال (کواترنری)، قابل مشاهده است.

خاک‌های کربناته[9]: تفسیر میزان C^{14} موجود در خاک‌های کربناته به‌سبب وابستگی آن به فاکتورهای گوناگون و پیچیده دشوار است. پاره‌ای از مهم‌ترین این فاکتورها عبارتند از:

۱. جابه‌جایی احتمالی خاک کربناته از محل ابتدایی ماده‌ی آلی.

۲. انحلال و دوباره رسوبگذاری ماده‌ی آلی موجود در خاک‌های کربناته در گذر زمان [Noller and others, 2000].

سپاسگزاری

با سپاس فراوان از آقای دکتر **حمید نظری**، از سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، به‌سبب بازخوانی، تصحیح نوشتار و تشریح روش‌های کاربردی.

* کارشناس شیمی ناحیه‌ی یک آموزش و پرورش شهرستان کرج

زیرنویس

1. Geochronology
2. Libby
3. Wood
4. Macrofossils
5. Charcoal
6. Bone
7. Peat
8. Paleosoil
9. Pedogenic carbonate

منابع

1. Bard, E.; Hamelin, B.; Fairbanks, R. G.; Zindler, A. 1990; Mathieu, G. and Arnold, M. Calibration of 14C timescale over the past 30000 years using mass spectrometric U/Th ages from Barbados coral. Nature. 345. 405-410.

2. McCalpin, J. P. 1996. Pleoseismology. 588 pp. Academic Press. San Diego, California.

3. Noller, J. S.; Sowers, J. M. and Lettis, W. R. 2000. Quaternary Geochronology, Methods and Application. 581 pp. and American Geophysical Union. Washington.

4. Stuiver, M. and Reimer, P. J. 1993. Extended C-14 data base and revised calib 3.0 C-14 age calibration program. Radiocarbon. 35. 215-230.