

DATIRANJE ARHEOLOŠKIH ARTEFAKATA METODOM ^{14}C

Dr.sc. **Ines Krajcar Bronić**, znanstvena savjetnica
Laboratorij za mjerenje niskih aktivnosti
Zavod za eksperimentalnu fiziku
Institut «Ruđer Bošković»
10000 Zagreb, Bijenička 54
tel. 01 4571 271
e-mail: krajcar@irb.hr

Predavanje u Gradskom muzeju Sisak, 12.2.2008.

Institutski broj: IRB-ZEF-2008/60

SAŽETAK

Određivanje starosti materijala metodom radioaktivnog izotopa ugljika, ^{14}C , je vrlo pogodna metoda za apsolutno datiranje materijala organskog porijekla starosti do oko 50000 godina. U živim bićima uspostavljena je ravnoteža između gubitka ^{14}C uslijed radioaktivnog raspada i nadoknađivanja iz atmosfere. Nakon smrti organizma prestaje i izmjena tvari, pa se koncentracija ^{14}C smanjuje radioaktivnim raspadom, te je moguće odrediti koliko je vremena proteklo od smrti organizma. Osnovne pretpostavke za uspješnost ^{14}C metode su: stalna i jednolika produkcija ^{14}C u atmosferi, jednolika raspodjela izotopa ^{14}C u biosferi, poznato vrijeme poluraspada izotopa ^{14}C , poznata aktivnost ^{14}C u uzorku u trenutku prestanka izmjene tvari s okolinom, te izostanak naknadne kemijske ili izotopne izmjene s ugljikom iz okoline nakon smrti organizma. Zbog nejednolike produkcije ^{14}C u atmosferi u prošlosti, potrebno je vršiti tzv. dendrokronološku kalibraciju izmjerene ^{14}C starosti.

Zbog niske aktivnosti ^{14}C u uzorcima kojima se određuje starost, te niske energije elektrona koji nastaje radioaktivnim raspadom ^{14}C , potrebne su posebne tehnike obrade i pripreme uzoraka u oblik pogodan za mjerenje, te posebne osjetljive tehnike mjerenja.

U ovom predavanju prikazat će se osnove metode određivanja starosti pomoću izotopa ^{14}C i različite tehnike mjerenja, kao i rad Laboratorija za mjerenje niskih aktivnosti na Institutu Ruđer Bošković u Zagrebu i uvođenje akceleratorne tehnike u Laboratorij. Bit će predstavljeni i neki rezultati datiranja arheoloških uzoraka i lokaliteta u Hrvatskoj.

UVOD

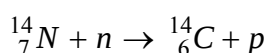
Jedan je od najvažnijih problema u arheologiji je određivanje starosti materijalnih ostataka (artefakata) koji svjedoče o ljudskoj djelatnosti. Problem datiranja posebno je izražen za artefakte iz pretpovijesnog doba kada još nema pisanih zapisa o kulturama i događajima.

Metode određivanja starosti ili datiranja možemo podijeliti u dvije grupe: 1) relativne metode, i 2) apsolutne metode datiranja. Metode relativnog datiranja pomažu nam u pronalaženju konteksta za pojedine nalaze i daju podatke o relativnim odnosim različitih artefakata, dok nam apsolutne metode datiranja daju točan podatak o starosti artefakta. Apsolutne metode datiranja zasnivaju se na nekoj prirodnoj pojavi koja ovisi o vremenu, koja je kumulativna, i koja se može mjeriti nekom od tehnika prirodnih znanosti. Neke od tih metoda koriste se brojanjem cikličkih pojava (godova drveća - dendrokronologija, ciklus rasta koralja, varve – godišnji slojevi sedimenta), ili koriste neki od kumulativnih učinaka zračenja (termoluminiscentno datiranje TL, optički stimulirana luminiscencija OSL, elektronska spinska rezonancija ESR, fisijski tragovi) ili kumulativnu apsorpciju (hidratacija obsidijana – vulkanskog stakla, datiranje fluorom). Većina metoda za određivanje apsolutne starosti ne samo u arheologiji, već pogotovo u geologiji, su radiometrijske metode, koje se zasnivaju na poznavanju brzine raspada nekog radioaktivnog izotopa. Vrijeme poluživota ili vrijeme poluraspada radioaktivnog izotopa je vrijeme potrebno da se ukupna količina tog izotopa u nekoj masi smanji na pola. Radioaktivnim raspadom dobili smo pouzdan "sat" za mjerenje vremena i postavljanje apsolutne vremenske skale. Vremenski raspon koji se može datirati nekom od radiometrijskih metoda ovisi o vremenu poluraspada izotopa jer mjerne tehnike najčešće omogućuju mjerenje količina radioaktivnog izotopa do desetak vremena poluraspada.

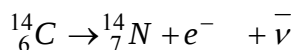
U određivanju starosti arheoloških nalaza najčešće se koriste termoluminiscentno (TL) datiranje, dendrokronologija i radiokarbonska metoda, tj. metoda radioaktivnog ugljika ^{14}C .

^{14}C

Ugljik se u prirodi nalazi u obliku 3 izotopa, ^{12}C (98,9%), ^{13}C (1,1%) i ^{14}C ($10^{-10}\%$). Izotopi ^{12}C i ^{13}C su stabilni, dok je ^{14}C radioaktivan izotop. ^{14}C nastaje u atmosferi međudjelovanjem neutrona iz kozmičkog zračenja i jezgara ^{14}N .



Nastali ^{14}C atomi oksidiraju u $^{14}\text{CO}_2$, koji se s oksidima drugih ugljikovih izotopa jednoliko raspodjeljuje po cijeloj atmosferi, hidrosferi i biosferi, te tako ulazi u životni ciklus biljaka, životinja i ljudi. Jezgra izotopa ^{14}C raspada se β raspadom, pri čemu se emitira elektron maksimalne energije 156 keV, a dio energije odnosi neutrino.



Vrijeme poluraspada izotopa ^{14}C je 5730 godina, što znači da je najveća moguća starost koju je moguće odrediti ovom metodom oko 60000 godina.

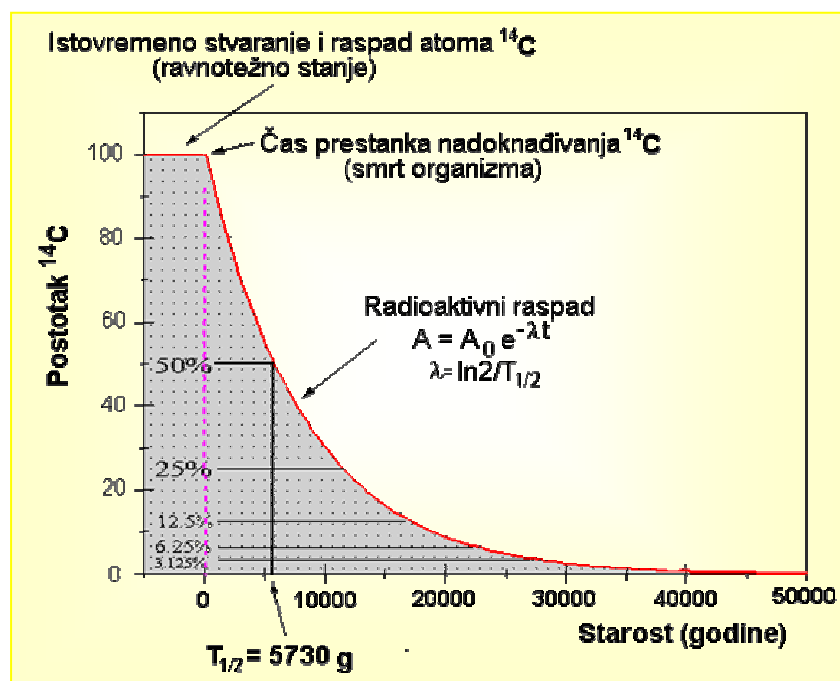
Izotop ^{14}C otkrio je 1947. Willard F. Libby u Chicagu. Tijekom 40-tih godina Libby je pokazao da izotop ^{14}C nastaje u gornjim slojevima atmosfere, i da se nalazi u suvremenom biloškom materijalu u koncentraciji od oko 10 raspada u minuti po 1 g ugljika. Uočio je i da se ta činjenica jednolike raspodjele u suvremenoj biosferi može iskoristiti za određivanje starosti biološkog/organskog materijala u arheologiji. Tijekom prve tri godine od otkrića Libby i suradnici izveli su prva mjerenja na suvremenim i povijesnim uzorcima, te time pokazali primjenljivost metode datiranja. Ovakva potvrda mogućnosti datiranja izazvala je praktički odmah veliko zanimanje, pa su se tijekom slijedećih godina osnovali mnogi ^{14}C

laboratoriji, a njihova mnogobrojnost pridonijela je različitim poboljšanjima sustava mjerenja, pripreme uzoraka, i obrade rezultata. Godine 1960. Libby je dobio Nobelovu nagradu za kemiju za razvoj metode određivanja starosti pomoću izotopa ^{14}C .

^{14}C metoda datiranja je metoda u kojoj se susreću različita područja prirodnih znanosti s arheologijom i umjetnošću: datiraju se uzorci u kojima je barem jedan dio ugljika biološkog porijekla, kemijskim postupcima se uzorci obrađuju i pretvaraju u kemijski oblik pogodan za mjerenje, aktivnost uzorka se mjeri fizičkim metodama, računala se koriste u obradi podataka i kalibraciji rezultata, a rezultati se primjenjuju u mnogim granama znanosti (arheologija, geologija, hidrogeologija, sedimentologija, oceanologija, geokemija ugljika, fizika kozmičkog zračenja, speleologija, meteorologija, klimatologija, biologija, ekologija, medicina, farmakologija). Osobito je značajna primjena ^{14}C metode za istraživanja o povijesti čovječanstva. Metoda je omogućila određivanje vremenske skale kasnog ledenog doba, te vremenske skale pojave čovjeka (civilizacije) i njegove aktivnosti širom Zemlje.

OSNOVNE PRETPOSTAVKE ^{14}C METODE DATIRANJA

Osnovna ideja metode određivanja starosti radioaktivnim ugljikom ^{14}C zasniva se na činjenici da je sav organski materijal u biosferi "obilježen" radioaktivnim izotopom ^{14}C , te da je koncentracija ^{14}C u živom organizmu stalna jer je stalnom izmjenom tvari uspostavljena ravnoteža između gubitka uslijed radioaktivnog raspada i unosa novih ^{14}C atoma. Nakon smrti organizma, odnosno nakon prestanka izmjene tvari, prestaje nadoknađivanje ^{14}C , te se njegova koncentracija smanjuje prema zakonu radioaktivnog raspada. Mjerenjem preostale aktivnosti ^{14}C u nekom materijalu organskog porijekla može se prema tome odrediti koliko je vremena proteklo od časa kad je nastupila smrt, tj. kad je prestala izmjena tvari (Slika 1.).



Slika 1. Radioaktivni raspad izotopa ^{14}C kao osnova izračunavanja starosti.

^{14}C starost je u biti samo mjera koncentracije atoma ^{14}C u ostacima nekoć živog biološkog organizma. Da bi se dobila informacija o stvarnim godinama starosti, potrebno je da budu zadovoljene neke pretpostavke:

1. stalni tok kozmičkog zračenja i stalna produkcija ^{14}C u atmosferi - Danas znamo da ta pretpostavka nije sasvim točna, pa smo definirali smo novu vremensku skalu, "radiocarbon time scale", koju je potrebno određenim dodatnim kalibracijskim postupcima pretvoriti u kalendarsku vremensku skalu. Rješavanje tog problema smo, međutim, prepustili drugima! Dendrokronolozi rješavaju problem kalibracije, naravno uz pomoć preciznih ^{14}C mjerenja. Ovim problemom pozabavit ćemo se kasnije.
2. jednolika raspodjela ^{14}C u biosferi - također nije u potpunosti ispunjena. Zbog izotopne frakcionacije, do koje dolazi zbog različite brzine kemijskih reakcija i fizikalnih procesa za razne izotope, koncentracija ^{14}C u atmosferi nije sasvim jednaka kao u biljkama (biosferi), ali se uz pomoć ^{13}C može izvršiti korekcija.
3. poznato vrijeme poluraspada - U prvim godinama primjene ^{14}C metode datiranja starost izmjerenih uzoraka računala se pomoću tada poznatog vremena poluraspada izotopa ^{14}C od (5568 ± 30) godina. Kasnije se vrijeme poluraspada ^{14}C točnije izmjerilo, i ono iznosi 5730 godina. Neki laboratoriji su za izračunavanje starosti prihvatili novu vrijednost, a neki su se nastavili služiti starom, tzv. Libby-jevom, vrijednošću vremena poluraspada ^{14}C , pa je neko vrijeme vladao kaos među objavljenim rezultatima, jer se često nije znalo s kojim vremenom poluraspada se starost izračunala. Dogovor ("konvencija") svih ^{14}C laboratorija iz 1985. godine riješila i taj problem.
4. smanjenje koncentracije ^{14}C ovisi samo o vremenu proteklom nakon smrti organizma - Nakon smrti organizma u uzorku nije došlo do naknadne izmjene (kemijske ili izotopne) s ugljikom iz okoline. Ova pretpostavka vrijedi za drvo i bilje, ako nije pljesnivo ili trulo, za drveni ugljen i kolagen u kostima, stoga se takvi materijali nazivaju "dobrim" materijalima za ^{14}C datiranje. Ostali materijali, kao anorganski dio kosti i karbonati, kod kojih je moguća naknadna izmjena s atmosferskim ^{14}C , nisu jako pogodni za primjenu u arheologiji. Taj problem kontaminacije i pravilnog izbora uzorka za datiranje ostaje uvijek prisutan.

Treba naglasiti da se metodom ^{14}C određuje starost materijala, a ne predmeta koji je od tog materijala izrađen. Npr., ako se određuje starost drvenog kipa, ^{14}C metodom odredit ćemo vrijeme kad je drvo prestalo rasti, a ne kad je neki umjetnik izradio kip. Ako su navedene pretpostavke ispunjene, ovom se metodom uspješno mogu datirati različiti organski materijali, kao što su drvo, drveni ugljen, treset, bilje, žito, tkanine, kosti, stari do 60 000 godina. ^{14}C metodom mogu se datirati i uzorci anorganskog porijekla koji barem djelomično sadrže ^{14}C izotop iz atmosfere. Tako se mogu odrediti ^{14}C starosti sekundarnih karbonata (sige, sedra, jezerski i morski sedimenti), školjaka, koralja, itd.

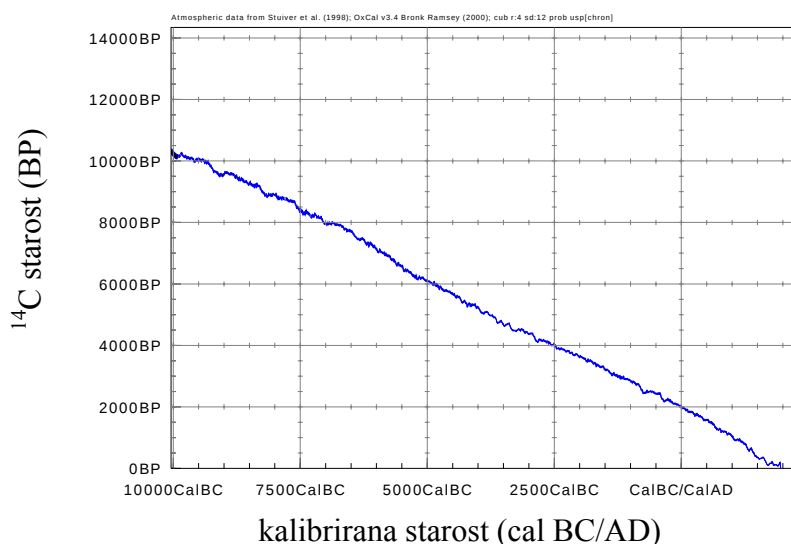
Vratimo se na prvu spomenutu pretpostavku - stalni tok kozmičkog zračenja i stalna produkcija ^{14}C u atmosferi. Pažljiva mjerenja pokazuju da tok kozmičkog zračenja nije bio u prošlosti konstantan, pa ni produkcija ^{14}C u atmosferi nije bila uvijek jednaka, što znači da ni ravnotežna koncentracija ^{14}C u trenutku smrti živih bića nije bila uvijek jednaka. Stoga je potrebno nekom nezavisnom metodom odrediti atmosfersku/ravnotežnu koncentraciju ^{14}C , te primijeniti određene korekcije na rezultate mjerenja.

Drvo sa svojim godovima, koji se stvaraju kao odgovor stabla na godišnji ciklus, predstavlja idealan materijal za datiranje, kao i za provjeru starosti koja je određena ^{14}C metodom. U prvoj polovici dvadesetog stoljeća razvila se dendrokronologija, ili metoda određivanja apsolutne starosti mjerenjem godina drveta i njihovim međusobnim odnosima. Do otkrića ^{14}C metode to je bila jedina metoda za precizno i apsolutno određivanje starosti. Da bi se starost nekog drvenog predmeta mogla dendrokronološki odrediti, potrebno je imati neprekinuti zapis oblika i širine godina od sadašnjosti što dalje u prošlost. Takvi zapisi nazivaju se kronološkim stupovima ili dendrogramima. Dobiveni dendrogrami mogu se koristiti/primijeniti za datiranje drva pronađenog na arheološkom nalazištu, kao i za

rekonstrukciju klimatskih promjene na određenom području. Danas postoji nekoliko kronoloških stupova zasnovanih na pojedinim vrstama drveta, od kojih neki dosežu do razdoblja kraja posljednjeg ledenog doba.

Već u ranim godinama razvoja i primjene ^{14}C metode datiranja pokušalo se usporediti starost godina koja je određena ^{14}C metodom s onom određenom dendrokronološki. Ustanovljena je sustavna razlika koja se sa starošću godina povećavala. Kombinacijom dendrokronologije i ^{14}C metode datiranja ustanovljene su tako varijacije u prirodnoj produkciji ^{14}C u atmosferi, poznavanje kojih je jedna od osnovnih pretpostavki ^{14}C metode. Time je pokazano i da pravilna interpretacija ^{14}C starosti ne ovisi samo o preciznosti mjerenja, nego i o ispunjenju uvjeta o poznatoj ^{14}C aktivnosti atmosfere u prošlosti.

Kalibracijske krivulje (Slika 2.) dobivene su usporedbom preciznih mjerenja ^{14}C aktivnosti godina drveta s njihovom točno poznatom starošću, koja je određena brojanjem godina (dendrokronološki). Na apscisi se nanosi dendrokronološka starost u kalendarskim godinama, a na ordinatu konvencionalna ^{14}C starost u godinama BP. Budući da godišnji priraštaj drveta ovisi prvenstveno o klimatskim karakteristikama regije, idealno bi bilo za svako karakteristično područje imati posebne kalibracijske krivulje. Kako takvi regionalni podaci zasad ne postoje, koristi se njemačka kronologija zasnovana na hrastu. Kalibracijske krivulje danas postoje u obliku računalnih programa. I dalje se ulaže veliki trud u poboljšanje krivulja i produljenje vremenske skale, o čemu se redovito izvješćuje na specijaliziranim ^{14}C kongresima i u stručnim i znanstvenim publikacijama. Tako su danas važeće krivulje iz 2004. godine, prema kojima se starosti do 12400 cal BP mogu apsolutno odrediti. Počinje se i s korekcijama koje se zasnivaju na usporedbi ^{14}C starosti i starosti određene metodom uranijevih i torijevih izotopa ($^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$) nekih materijala koji pokazuju strukturu sličnu godovima drveta, npr. koralji, a koji mogu pokriti cjelokupni raspon starosti koje je moguće odrediti ^{14}C metodom.



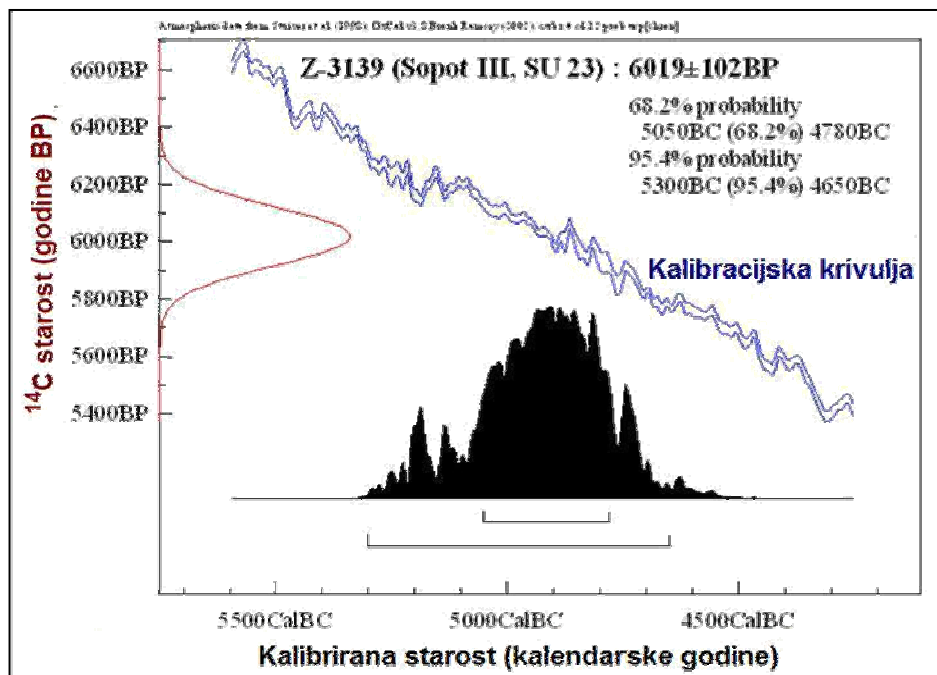
Slika 2. Primjer kalibracijske krivulje.

Na ovom mjestu bilo bi zgodno nešto reći o načinu izražavanja starosti. Način izražavanja godina/starosti u arheologiji su kalendarske godine BC/AD. Različite metode mjerenja starosti daju godine prije sadašnjosti, ali ne direktno povezane s kalendarskim godinama, jer se "sadašnjost" mijenja, ako nije definirana. Prema ^{14}C konvenciji, tj. prema dogovoru svih ^{14}C laboratorija iz 1985. godine, definirani su sljedeći pojmovi:

- ⇒ "sadašnjost" ili početak brojanja unatrag je godina 1950. AD (= 0 BP);
- ⇒ za račun se koristi $T_{1/2} = 5568$ god (staro ili Libby-jevo vrijeme poluraspada), kalibracijske krivulje određene su na osnovu tog vremena poluraspada;
- ⇒ rezultati se izražavaju kao "konvencionalna ^{14}C starost" pomoću "starog" vremena poluraspada (5568 god) u godinama **BP** (*Before Present*), pri čemu nje uvijek provedena i korekcija pomoću ^{13}C (o čemu ovdje nećemo govoriti);
- ⇒ koriste se preporučene kalibracijske dendrokronološke krivulje;
- ⇒ Konačni rezultati nakon dendrokronološke kalibracije konvencionalne ^{14}C starosti izražavaju se u **kalendarskim godinama cal BC**, odnosno **cal AD**, gdje je **cal** oznaka za kalibrirane starosti.

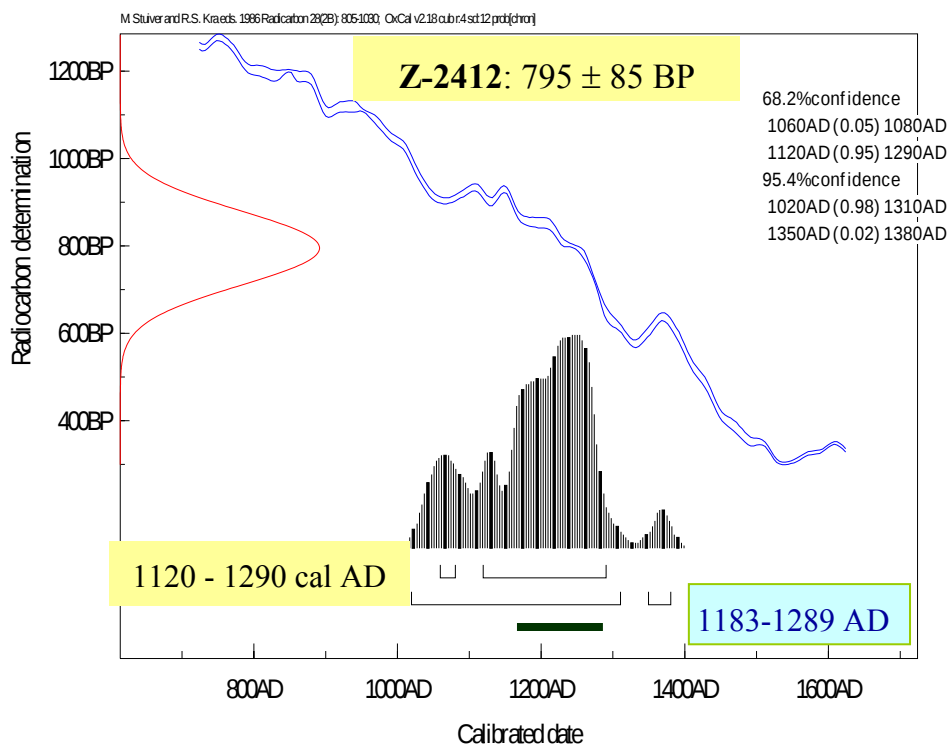
Konačni rezultat ^{14}C datiranja sadrži konvencionalnu ^{14}C starosti (u godinama BP) i dendrokronološki kalibriran vremenski raspon izražen u **cal AD/cal BC**. Budući da se često dobije više kalendarskih razdoblja, svaki od njih daje se s pripadnom vjerojatnošću. Sljedeći primjeri ilustriraju karakteristične slučajeve.

Neka je konvencionalna ^{14}C starost uzorka 6019 ± 102 BP. Primjer je uzorak Z-3139, drveni ugljen iz kuće SU 23 (sonda 3, kv. A-8, dubina 3.89-3.99 m) Vinkovci, sopotska kultura, Sopot III. Na Slici 3. je prikazana kalibracijska krivulja za godine 5400 - 6600 BP, rezultat konvencionalne ^{14}C starosti s pogreškom kao normalna raspodjela uz ordinatu s lijeve strane grafa, te konačna raspodjela kalendarske starosti u donjem dijelu grafa. Primjećujemo da je raspodjela kalendarske starosti nepravilnog oblika zbog nejednolikosti kalibracijske krivulje. U gornjem desnom kutu grafa dane su vjerojatnosti kalendarskih razdoblja. Ukoliko se zadržimo na intervalu pouzdanosti od 1σ (vjerojatnost 68.2% da se unutar danog intervala nalazi točna starost uzorka), tada je razdoblje porijekla našeg uzorka vremenski interval između 5050 cal BC i 4780 cal AD. Ukoliko želimo pouzdaniji rezultat (interval pouzdanosti 2σ), tj. da se starost uzorka nalazi unutar danog intervala s vjerojatnošću 95.4%, tada je razdoblje porijekla nešto prošireno, 5300 cal BC - 4650 cal AD.



Slika 3. Primjer kalibracije uzorka Z-3139.

Zanimljiva je usporedba dendrokronološke starosti (određene mjerenjem godina) s dendrokronološki kalibriranom ^{14}C starošću na primjeru uzorka Z-2412: drvena vrata na ulazu u jarak srednjevjekovnih gradskih zidina u Zagrebu, ^{14}C starosti 795 ± 85 BP. Na slici je prikazana kalibracijska krivulja i rezultat kalibracije ovog uzorka. Unutar 1σ intervala pouzdanosti i s relativnom vjerojatnošću 96%, što čini ukupnu vjerojatnost od 64.4%, vremenski interval porijekla ovog uzorka je 1150 - 1290 cal AD. Drugi intervali, 1060 - 1080 cal AD i 1120 - 1140 cal AD, imaju ukupne vjerojatnosti manje od 5%, koje se obično zanemaruju, odnosno ne priopćavaju kao rezultat. Dendrokronološki je određeno vrijeme porijekla ove grede 1183 - 1289 AD, što se izvrsno slaže s najvjerojatnijim intervalima određenim dendrokronološkom korekcijom konvencionalne ^{14}C starosti ovog uzorka.



Slika 4. Primjer kalibracije uzorka Z-2412 i usporedba s dendrokronološkom starošću.

TEHNIKE MJERENJA

Danas postoje tri osnovne tehnike mjerenja ^{14}C aktivnosti u raznim materijalima. Dvije su radiometrijske ili "klasične" (tehnika mjerenja plinskim proporcionalnim brojačima - GPC, i tekućinskim scintilacijskim brojačima - LSC), te akceleratora masena spektrometrija - AMS. Zajednička im je karakteristika da su sve tri metode destruktivne, tj. da bi se odredila starost nekog organskog uzorka potrebno je uzorak spaliti i dalje pripremiti u obliku pogodnom za mjerenje ^{14}C aktivnosti. U kakvom se obliku (plin CO_2 ili CH_4 , benzen, grafit) konačno uzorak mjeri, ovisi o samoj tehnici mjerenja.

Energija elektrona koji nastaje radioaktivnim raspadom ^{14}C je jako niska (<156 keV), a i broj raspada u prirodnim materijalima (pogotovo starijim!) je jako mali (< 13 raspada ^{14}C u 1 g ugljika), pa je za mjerenje aktivnosti uveden poseban naziv: *Low-level measurement techniques*, što bi trebalo prevesti s *Tehnike mjerenja niske radioaktivnosti*. U postupku kemijske pripreme uzoraka posebna se pozornost posvećuje dobrom iskorištenju svih reakcija i izbjegavanju kontaminacije/onečišćenja ugljikom iz okoline.

Ukoliko se za mjerenje ^{14}C aktivnosti koristi plinski proporcionalni brojač (*GPC - Gas Proportional Counter*), potrebno je određenim kemijskim postupcima dobiti neki plin koji sadrži sav ugljik iz uzorka, a istovremeno je "dobar brojački plin", tj. može se koristiti kao radni plin brojača. Plinski proporcionalni brojači uvedeni su kao tehnika mjerenja 1952. godine, a kao brojački plin koristio se CO_2 . Budući da je za upotrebu CO_2 potrebno jako dobro pročišćavanje plina, kasnije se prešlo na korištenje metana CH_4 , koji nije tako osjetljiv na nečistoće, a ima i bolje osobine kao "brojački plin". Ponekad se koristi i acetilen. Brojački plin u proporcionalnom brojaču je istovremeno izvor zračenja i detektor zračenja. Elektron koji nastaje β radioaktivnim raspadom ^{14}C u sudarima s molekulama metana izaziva pobuđenja i ionizacije atoma metana, a tako nastali elektroni se u električnom polju unutar brojača ubrzavaju, u daljnjim sudarima stvaraju nove elektrone, i tako stvaraju tzv. lavinu elektrona. Takav proces plinskog pojačaja je glavna karakteristika plinskih proporcionalnih brojača, i bitan je za detekciju elektrona niske energije, kao što su oni nastali raspadom ^{14}C .

Tekućinski scintilacijski brojači, LSC, su se pojavili također 50-tih godina, ali su u široj primjeni tek nakon 60-tih godina nakon razvoja tehnike pripreme benzena iz uzorka za mjerenje ^{14}C , ali su plinski brojači ostali osjetljiviji, i mogli su izmjeriti veće starosti. Tijekom 70- i 80-tih godina uveli su se i u LSC dodatni štitovi i dodatni antikoincidentni sklopovi, tako da se 1984. godine pojavio prvi ultra-low-level LSC *Quantulus*, koji je danas jedan od najraširenijih LSC za ^{14}C datiranje.

Plinski proporcionalni i tekućinski scintilacijski brojači broje raspade radioaktivnog izotopa ^{14}C , te se te tehnike mjerenja nazivaju "klasičnim" ili radiometrijskim tehnikama mjerenja. Potrebna količina uzorka za jednu analizu ovisi o veličini brojača i tipu uzorka, a najčešće se radi o nekoliko grama čistog ugljika, odnosno 10-50 g uzorka, ili 300-500 g kosti iz kojih se izdvaja kolagen. Kod starih uzoraka je količina ^{14}C vrlo mala, broj radioaktivnih raspada u jedinici volumena je mali, pa je i brojanje otežano, te je stoga granična starost koja se još može izmjeriti tim tehnikama oko 40 000 godina (GPC), odnosno 55 000 godina (LSC). Kod mjerenja GPC i LSC potrebno je smanjiti pozadinsko zračenje koje uglavnom dolazi od kozmičkog zračenja. U tu svrhu uvode se tzv. štitovi oko brojačkih jedinica: sloj željeza i olova protiv γ zraka, sloj parafina s borom protiv neutrona, zaštitni brojači spojeni u antikoincidenciju s "centralnim" brojačem, smještaj brojača u podrumске/podzemne prostorije. Dodatna poboljšanja napravljena su 90-tih godina zahvaljujući napretku u računalnoj tehnologiji - softverski je smanjen background na osnovu analize oblika impulsa, a pravu revoluciju su doživjeli i bilježenje signala, obrada podataka, spremanje rezultata, pretraživanje baza podataka itd.

Nasuprot klasičnim tehnikama, akceleratoriska masena spektrometrija (AMS) ne mjeri raspade već ukupni broj ^{14}C izotopa u odnosu na broj najzastupljenijeg izotopa ^{12}C u uzorku u obliku grafita. Na brojanje ^{14}C izotopa ne utječe kozmičko zračenje, koje je glavni izvor šuma kod plinskih i tekućinskih brojača. Stoga se AMS tehnikom može odrediti starost znatno manje količine uzorka, nekoliko miligrama ili manje (zrno žita, komadić tkanine), a i granična starost je viša, do 60 000 godina. Jedan od problema, upravo zbog male količine potrebnog uzorka, je mogućnost kontaminacije suvremenim ugljikom u tijeku obrade uzorka, kao i problem reprezentativnosti uzorka. Dodatne prednosti AMS metode su kratko vrijeme mjerenja (desetak minuta) i manja pogreška, ali je znatno skuplja i ograničena na velike nuklearne mašine. Ipak, treba reći da u svijetu broj AMS uređaja specijaliziranih za ^{14}C datiranje raste, te raste i broj mjerenih uzoraka, odnosno mogućnosti za mjerenje tom tehnikom, pa i cijena pada.

LABORATORIJ ZA MJERENJE NISKIH AKTIVNOSTI

Laboratorij za mjerenje niskih aktivnosti (LNA) Instituta Ruđer Bošković u Zagrebu postoji od 1968. godine, i od tada se mjeri ^{14}C . Do sada je izmjereno oko 4000 uzoraka ^{14}C metodom (arheoloških, paleontoloških, geoloških, hidroloških, ekoloških, umjetničkih predmeta). Oko 700 uzoraka odnosi se na arheološke uzorke: drveni ugljen, drvo, žito, kosti (ljudske, životinjske), uglavnom s područja bivše Jugoslavije, a starosti se kreću od Paleolitika do modernih uzoraka. Prema literaturi, oko 1/6 ^{14}C mjerenja u svijetu odnosi se na arheološka mjerenja, a i kod nas je takav omjer. Svaki uzorak obilježen je oznakom našeg laboratorija (Z) i rednim brojem. Rezultati ^{14}C datiranja publiciraju se u časopisu *RADIOCARBON* u obliku liste podataka (*data lists*). U takvim se člancima objavljuju rezultati ^{14}C datiranja uzoraka u nekom laboratoriju, s kratkim opisom uzorka, informacijama o nalazištu i donositelju uzorka, te konvencionalnom ^{14}C starošću i dendrokronološki kalibriranim starostima. Do sada smo, od 1971. do danas, objavili 15 takvih članaka.

Laboratorij je malen, ukupno 6 zaposlenika, od toga tri znanstvenika, dva znanstvena novaka i 1 tehničar. Od početka rada Laboratorija, za mjerenje se koriste proporcionalni brojači punjeni metanom, pa smo razvili i posebne kemijske metode pripreme metana iz raznih vrsta uzoraka. Organski uzorci se nakon čišćenja od nečistoća spaljuju u struji kisika, a tako dobiveni ugljični dioksid reagira s vodikom i dobije se metan. Mi također radimo datiranja anorganskih uzoraka, kao što su sige i sedre, jezerski sedimenti s područja Dinarskog krša, pogotovo s Plitvičkih jezera. Takvi karbonatni uzorci se otapaju u kiselini i razvija se pri tome CO_2 . Od 2001. godine koristi se i LSC *Quantulus*, najbolji LSC brojač za ^{14}C datiranje, koji omogućuje mjerenje starosti do 55 000 godina u idealnim uvjetima. Razvili smo pripremu benzena - iz CO_2 se u reakciji s litijem dobije litijev karbid, koji u reakciji s vodom stvara acetilen, koji se u katalitičkoj reakciji polimerizira (trimerizira) u benzen.

Posljednjih nekoliko godina radimo na razvoju AMS tehnike mjerenja, točnije na razvoju metoda priprema grafita iz malih količina uzoraka. Uz pomoć projekta s Europskom komisijom iz 6. okvirnog programa, pod nazivom "Preparation of carbon samples for ^{14}C dating by the AMS technique", konstruirali smo liniju za pripremu grafita, koji se mjeri na akceleratoru u Glasgowu. Rezultati prvih testova su obećavajući.

PRIMJENA U ARHEOLOGIJI

^{14}C datiranje je jedna od najčešće upotrebljivanih metoda kojom se u arheologiji određuje apsolutna starost materijala/artefakata, te se time određuje vrijeme nekog događaja s kojim su materijalni nalazi povezani. Materijal (tj., uzorak) koji se datira treba zadovoljavati neke uvjete:

- ⇒ uzorak je biološkog podrijetla (^{14}C iz atmosfere ugrađen u uzorak)
- ⇒ jasno povezan s određenim arheološkim događajem (asocijacija)
- ⇒ čist uzorak (nije došlo do kontaminacije).

Kod uzimanja uzorka treba paziti da je uzorak reprezentativan, što znači, porijeklo treba biti poznato, lokacija uzimanja, te ostali podaci. Posebno je važno da kod samog uzorkovanja ne dođe do kontaminacije uzorka, npr. primjesama iz drugog sloja. Uzorak treba uzimati čistim priborom, a neka posebna oprema nije potrebna. S uzorka treba mehanički ukloniti zemlju i vidljive biljke, korjenčiće, i slično. Vlažan uzorak potrebno je osušiti (na zraku ili u sušioniku), te spremiti u plastični vrećicu. Važno da se uzorak ne konzervira bilo kakvim sredstvima, jer ona mogu sadržavati ugljik drugačijeg porijekla, također se uzorak ne smije umatati u papir, tkaninu ili vatru, odnosno bilo kakav organski materijal, jer može doći do onečišćenja uzorka suvremenim ugljikom. Ukoliko je potrebno, suh uzorak se može umotati u

alu-foliju. Svaki uzorak potrebno je jasno označiti - vrsta materijala, lokacija, datum uzorkovanja, te ostali relevantni podaci. Ako se radi o komadu drveta na kojem su vidljivi godovi, potrebno je označiti koji su godovi i koliko njih uzeti za analizu. Tako spremljen i označen uzorak možete poslati na adresu našeg Laboratorija, a potrebno je popuniti i tzv. obrazac sa svim podacima o uzorku, nalazištu, načinu uzorkovanja i pohranjivanja, osobama za kontakt, eventualno postojećim starijim podacima o datiranju, itd. Obrazac je napravljen prema sličnima u svijetu, a potreban ja da se dobije standardizirana dokumentacija o uzorcima za interpretaciju rezultata mjerenja, za publiciranje u časopisu *RADIOCARBON* i uključivanje u međunarodnu bazu podataka.

Svi podaci o uzorcima datiranim u našem Laboratoriju nalaze se u našoj bazi podataka. Uzorci su označeni šifrom Z- (što je "međunarodna" jedinstvena oznaka našeg Laboratorija, od Zagreb) i rednim brojem. Iza rednog broja slijedi oznaka za vrstu materijala, te naziv serije uzoraka (ukoliko se ne radi o pojedinačnom uzorku), puni naziv uzorka, redni broj unutar serije. Slijede podaci o uzorkovanju: datum, lokacija, država, osoba, institucija, te mogući komentar o uzorku ili uzorkovanju. Slijedeća grupa podataka odnosi se na obradu uzorka u Laboratoriju i kemijsku pripremu metana, a zatim slijedi grupa podataka o mjerenju. Na kraju je rezultat, izražen kao godine BP, ili na neki drugi način prema usvojenoj konvenciji, te podaci o eventualnim prethodnim mjerenjima istog uzorka. U svakom trenutku mogu se izlistati podaci o nekom uzorku, seriji uzoraka, uzorcima po vrsti materijala ili datumu pripreme ili mjerenja, ili nekom drugom podatku koji je zapisan u bazi.

Laboratorij IRB-a uspješno surađuje s raznim institucijama, muzejima, fakultetima. Između ostalih uzoraka, u našem Laboratoriju izvršena su i slijedeća značajnija datiranja za hrvatsku arheologiju: paleolitičke kulture u špiljama Bezdanjača, Šandalja, Velika pećina i Vindija, neolitička naselja starčevačke kulture (Zadubravljje – Dužine i Slavonski Brod – Galovo) i sopske kulture (Sopot, Dubovo – Košno, Otok, Vinkovci, Hermanov vinograd kod Osijeka, Slavča kod Nove Gradiške), eneolitička naselja u Vinkovcima i Vučedolu (badenska, kostolačka i vučedolska kultura), naselja iz željeznog doba (Kaptol u Požeškoj kotlini) i rimskog doba (Ščitarjevo, Sisak, Varaždinske toplice), Zagrebačka lanena knjiga, antičko brodogradnja (Punta Sv. Ivana, Zlarin), antičke luke (Gradina, Vranjičko blato), staro hrvatsko brodogradnja (Nin), čamci-monoksili u Kupi, Savi, Čazmi, crkva Sv. Donata i škrinja Sv. Šimuna u Zadru, samostan Klarisa u Zagrebu, i druga.

1. PREGLED ARHEOLOŠKIH DATIRANJA

Najprije bih kao pregled prikazala zbirne rezultate ^{14}C mjerenja arheoloških uzoraka s područja bivše Jugoslavije. Datirano je oko 700 arheoloških uzoraka - drveni ugljen, drvo, žito, ljudske i životinjske kosti, s raličitim lokacija. Starosti se kreću od paleolitskog doba do kraja 19. stoljeća. Slika (slika 1 iz članka Lyon) prikazuje raspored lokacija i razdoblje iz kojeg su datirani uzorci. Paleolitička nalazišta (starosti od 10000 godina do granice metode) nisu ovdje prikazana, a radi se nekoliko pećina u Sloveniji i sjeverozapadnoj Hrvatskoj (Vindija, Velika Pećina, Pupičina Peć i Šandalja, Kopačina). Mezolitik se povezuje s pećinama duž Jadranske obale i na Dunavu (Lepenski Vir). Neolitička naselja (tzv. starčevačka kultura) u Makedoniji i južnoj Panoniji, posebno u oklici Slavenskog Broda, i duž Jadrana, te druge neolitičke kulture (Vinčanska, Sopska). Eneolitičko razdoblje se povezuje s dolaskom stočarskih naroda s Istoka (Indoeurolpljani), a najstarija kultura je Badenska, koja kasnije prelazi u autohtone kulture, Kostolačku i Vučedolsku, na južnom rubu Panonske nizine. Ove tri kulture se jasno vide na području arheološkog nalazišta Vučedol. Eneolitičke kulture završavaju Vinkovačkom kulturom, koja već zalazi u razdoblje brončanog doba, i opaža se paralelno na nekoliko nalazišta (Grabrovac, Rudina). U Željeznom dobu razvijaju se naselja na brežuljcima (primjer: Gornji grad u Zagrebu). Cijelo područje jugoistočne Europe kulturno je ujedinjeno za vrijeme Rimskog carstva. Datirali smo velika rimska naselja - Stobi,

Siscia, Andautonia, Aque Iasse, Pola, te jadranska brodogradilišta (Pelješac, Lastoco, Nin, Zlarin). Srednjevjekovni i moderniji uzorci dobiveni su najčešće tijekom restauratorskih radova ili zaštitnih iskopavanja (ili slučajnih otkrića) gradskih jezgara (Zagreb, Čakovec, Zadar, Dubrovnik, Nin).

2. SISAK

Razna datiranja uzoraka iz Siska prikazana su u tablici. Uglavnom se radi o uzorcima iz rimskog doba, Siscie, nešto brončanog doba, srednji vijek (Stari grad).

3. LIBER LINTEUS ZAGRABIENSIS

Etrušćanski zapis (1200 riječi) na lanenom platnu, Arheološki muzej u Zagrebu; najdulji zapis na još uvijek zagonetnom etrušćanskom jeziku. U rješavanju zagonetke tog jezika natpis može puno pomoći. Platno korišteno u Egiptu rasječeno u trake kao povoj za mumiju. Porijeklo *Lanene knjige* nije sasvim poznato 1) napravljena u Etruriji, pa prenešena u Egipt, ili 2) napisano u etrušćanskoj zajednici u Egiptu. Prema stilu, pretpostavljeni periodi 3 st. BC, 1. st. BC, 1. st. AD. Datirani su fragmenti bez zapisa, lišće, tkivo mumije (AMS) (Tablica 1.). Za mjerenje u plinskim proporcionalnim brojačima bil je potrebno oko 5 g platna, za AMS samo 10 mg, oko 1 cm².

Tablica 1. Rezultati datiranja Lanene knjige i mumije metodom ¹⁴C.

Naziv uzorka	Oznaka	¹⁴ C starost (BP)	Kalibrirana starost
<i>Liber linteus Zagradiensis</i>	OxA-1680	2110 ± 60	360 cal BC-cal AD 5
Tkivo mumije	OxA-1386	2160 ± 80	385 - 210 cal BC
Laneni povoj	Z-1653	2290 ± 40	405 - 210 cal BC
	GrN-13875	2210 ± 13	365-205 cal BC
	GrN-14442	2335 ± 15	405-395 cal BC
	OxA-1387	2760 ± 90	1010-800 cal BC
	OxA-1388	2700 ± 90	980-790 cal BC
Lišće	Z-1654	2580 ± 60	900-520 cal BC
	GrN-14467	2825 ± 15	1015-925 cal BC
	OxA-1389	2920 ± 100	1400-905 cal BC

Usporedna mjerenja u tri laboratorija pokazuju da su lanena knjiga (LLZ) i mumija (tijelo) istovremeni, da su korišteni i stariji povoji, te da je ukrasno lišće uzeto s neke starije mumije.

Zaključak: mumija 385 - 210 cal BC

 LLZ 360 cal BC - 5 cal AD

LLZ nije bila napisana nakon mumije (morala je biti prije 210 cal BC), niti je mumija omotana prije nego je LLZ postojao (moralo je biti iza 360 cal BC) → tako se došlo do razdoblja postanka LLZ 360 cal BC - 210 cal BC, dakle potvrđena je pretpostavka o 3 st. BC.

4. SLAVONSKI BROD – GALOVO

Dosadašnja višegodišnja sustavna arheološka istraživanja na Galovu u Slavonskom Brodu otkrila su dio naselja u kojem arheološka građa prema stilskim odlikama lončarstva pripada Linear A stupnju starčevačke kulture. Pokapanje mrtvih unutar naselja između stambenih i radnih zemunica bilo je uobičajeno u starčevačkoj kulturi. Međutim, u Galovu je po prvi puta otkriven ukopni prostor – jame s pokojnicima i kulturni objekti koji su bili izdvojeni unutar naselja, drvenim ogradama, što ukazuje na do sada nepoznat način organizacije života plemenske zajednice. Arheološkim istraživanjima objekata u naselju izgrađenih jedne iznad drugih, uočene su dvije faze izgradnje, dok je ostalo otvoreno pitanje vremenskog odnosa okolnih samostojjećih objekata u prostoru naselja. Rješenje su pružile ^{14}C analize uzoraka ugljena, koje su potvrdile vremenske razlike dvije faze izgradnje, a jednu stambenu zemunicu i grobnu jamu odredile su u najmlađu (treću) vremensku fazu u istraženom dijelu naselja (Slika 5).

U prvoj fazi, u kojoj su objekti bili izgrađeni između 6100 i 5700 cal BC, obredno-ukopni prostor je u svojem zapadnom dijelu zauzimao mnogo veću površinu unutar naselja, što je vidljivo po položaju dviju drvenih ograda koje su dijelile stambeni od ukopnog dijela naselja. Rupe od velikih drvenih stupova uz rub središnjeg prostora vjerojatno su držale šatorastu konstrukciju u kojem se moglo kretati oko skupine velikog obrednog posuđa. Ostaci ugljena (Z-2936) iz sjevernog dijela velike grobne jame 9 datirani su u vrijeme od 5810 - 5620 cal BC.

Zapadno od velike grobne jame 9 bila su dva kulturna objekta (ili samo jedan) od kojih je samo zapadni kulturni objekt 149 i njegova obnovljena konstrukcija datirana metodom ^{14}C . Iz prostora zapadnog kulturnog objekta datirana su ostaci ugljena triju različitih dijelova, jer je vidljivo da su bili obnavljani na istom mjestu ukopavajući rovove za ogradu jednu nedaleko druge. Tako su uzorci ograde 89 (Z-3584, 6070 – 5770 cal BC) i 149 (Z- 3586, 6000 – 5740 cal BC) nešto stariji od ograde 389 (Z-3587, 5850 – 5710 cal BC).

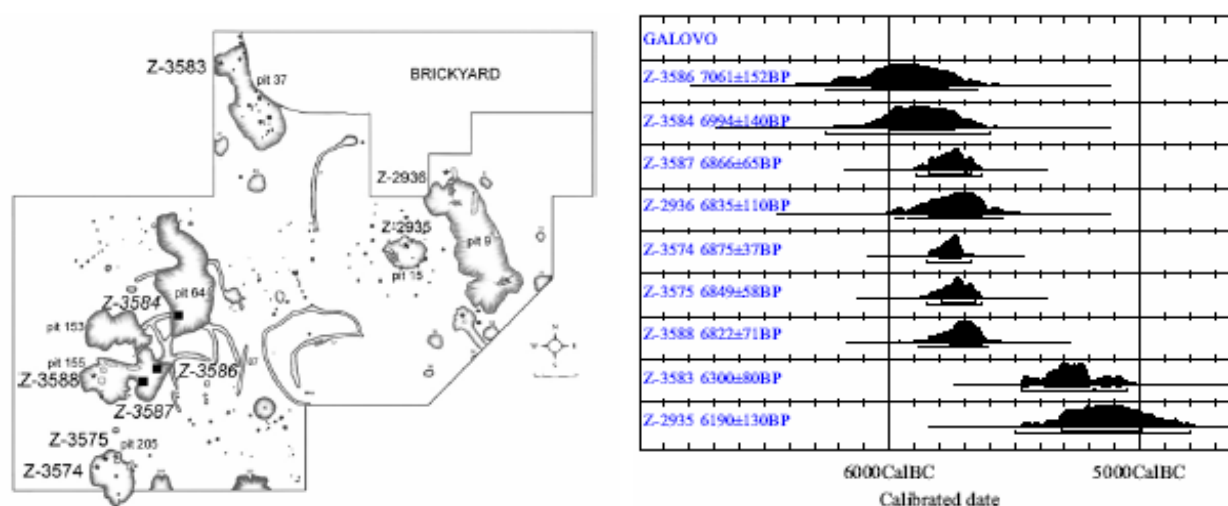
U radnoj zemunici 205, tlocrtno veličine 7 x 5 m, otkriveni su ostaci krušne peći, vertikalnog tkalačkog stana i izdužene lončarske peći. Ostaci ugljena u pepelu ispred krušne peći (Z-3574) datirani su metodom ^{14}C u 5800 – 5715 cal BC. Na sjevernoj strani zemunice nađeni su ostaci drvenog okvira od vertikalnog tkalačkog stana (Z-3575, datirani u 5790 - 5660 cal BC) i dvije skupine glinenih utega piramidalnog oblika (blizu 30 komada).

U mlađoj fazi, datiranoj blizu 5700 cal BC, naselje se proširilo prema jamama s pokojnicima i time smanjilo površinu ukopnog prostora. Iznad zapadnoga kulturnog objekta 149 i njegove sjeverne lučne drvene ograde 73, koja je novom izgradnjom izgubila svoju funkciju, bile su izgrađene tri velike zemunice 64/107, 153 i 155. Naselje starčevačke kulture na Galovu je među najstarijim primjerima širenja stambenog dijela naselja prema prostoru za pokojnike što je česti slučaj u brojnim naseljima tijekom povijesti, pa i u današnjim velikim gradovima. Analize ugljena metodom ^{14}C odredile su radnu zemunicu 155 (Z-3588) u vrijeme 5760 – 5630 cal BC i opredijelile pored nje skupinu susjednih zemunica u mlađu fazu izgradnje naselja.

Trećoj, najmlađoj fazi ovog dijela naselja pripadaju stambena zemunica 37 i mala grobna jama 15. Raspored unutrašnjeg prostora stambene zemunice 37 razlikovao se od ostalih stambenih zemunica u naselju po tome što je cijela zemunica bila samo jedna prostorija s plitko ukopanim neravnim dnom podjednake dubine u cijelom prostoru, što ukazuje da je ovdje najvjerojatnije bila spavaonica za više članova obitelji. Analize ugljena metodom ^{14}C datirale su ovaj objekt kao najmlađi stambeni objekt u istraženom dijelu naselja, iz perioda 5380-5290 cal BC (Z-3583).

Nasuprot stambene zemunice 37, u sjeverozapadnom ukopnom prostoru smjestila se mala grobna jama 15, datirana ^{14}C metodom kao najmlađi istražen objekat, u vremenu 5300 - 4960 cal BC (Z-2935). Ova mala grobna jama 15, promjera 5 m, izgrađena je u sredini praznoga zapadnog dijela obredno-ukopnog dijela naselja i dominirala je ovim prostorom

okružena velikom nadstrešnicom i trijemom iznad ulaza, koju su držali nizovi drvenih stupova. U zapadnom dijelu bio je pokopan muškarac u dobi 35 – 40 godina u skvrčenom položaju, bez lica. Kamene sjekire i klinovi te žrtvene posudice priložene uz pokojnika u maloj grobnoj jami možda upućuju na njegov istaknut položaju u plemenu. Tomu u prilog ide i činjenica da je u zemunici ukopana samo jedna individua, a inače se u grobnim jamama starčevačke kulture uvijek ukopavaju zajedno skupine pokojnika. Prema ostacima rupa od stupova vidljivo je da je iznad ove grobne jame bila velika nadstrešnica i iznad ulaza posebno natkriti trijem, što je davalo grobnoj jami posebno svečani karakter. Sve ovo upućuje na pomisao da su u stambenoj zemunici 37 živjeli članovi obitelji pokojnika ukopanog u grobnoj jami 15, isknutog člana plemena (možda vođe ili vrača).



Slika 5. Tlocrt neolitičkog naselja Slavonski Brod – Galovo s označenim uzorcima za ^{14}C datiranje (lijevo), te rezultati ^{14}C datiranja i raspodjele kalibriranih rezultata (desno).

Rezultati mjerenja uzoraka ugljena iz obližnjeg starčevačkog naselja u Zadubravlju pokazali su vremenski raspon objekata u istraženom dijelu od 6600 do 5300 cal BC. Stilsko opredjeljenje arheološke građe iz Zadubravlja i Slavenskog Broda u stupanj Linear A potvrdile su njihovu istovremenost datiranja metodom ^{14}C (6100 do 5000 cal BC).

Prva datiranja naselja starčevačke kulture metodom ^{14}C u Hrvatskoj donijela su višestruke znanstvene rezultate. Utvrdile su vremensku pripadnost naselja unutar kronološkog slijeda ranoneolitičkih naselja starčevačkog kulturnog kompleksa i otkrila razvitak naselja Galovo u Slavanskom Brodu kroz tri faze izgradnje. Arheološkim metodama nije se mogla utvrditi moguća vremenska razlika u izgradnji pojedinih naseobinskih cjelina, pogotovo u dijelu naselja gdje su objekti izgrađeni jedan pored drugoga. Ovo otežava još i činjenica da inventar svih do sada otkrivenih objekata u naselju Galovo u Slavanskom Brodu pripada po svojim stilskim osobinama samo jednom stupnju Linear A starčevačke kulture, koji je u ovim prostorima trajao dulje vremensko razdoblje. U ovakvom slučaju jedinu mogućnost otkrivanja vremenske razlike u izgradnji naseobinskih objekata mogu pružiti datiranja metodom ^{14}C . Analize ovom metodom potvrdile su ne samo vremensku razliku između donjih i gornjih objekata (prva i druga faza naselja), nego su još otkrile i treću fazu izgradnje naselja. Datiranje stambene zemunice 37 i grobne jame 15 u najmlađe izgrađene objekte u ovom dijelu naselja, omogućilo je po prvi puta, znanstveno utemeljen prikaz horizontalne stratigrafije jednog od najstarijih ranoneolitičkih naselja kontinentalne Hrvatske.

ZAKLJUČAK

Metoda određivanja starosti pomoću radioaktivnog izotopa ugljika ^{14}C (često zvana i radiokarbonska metoda) je jedna od najčešće korištenih metoda određivanja apsolutne starosti arheoloških artefakata biološkog podrijetla. Ovom metodom se mogu uspješno datirati uzorci kao što su drvo, drveni ugljen, kosti, žitarice, platno, do starosti od oko 50 000 godina.

Rezultat ^{14}C starosti predstavlja starost materijala, a ne predmeta, što je naročito važno kod primjene u (povijesti) umjetnosti. Osim jednostavnog cilja - određivanja starosti nekog materijala - datiranjem većeg broja uzoraka s jednog nalazišta, te više uzoraka s različitih nalazišta, moguće je odrediti pojavu i kretanje određene kulture, njenu raširenost i završetak. Za primjenu u arheologiji, ali i u mnogim drugim područjima, potrebno je zapamtiti pravilo: pojedinačan rezultat često nije nikakav rezultat. Dobri rezultati mogu se očekivati samo ako je nalazište ili vremensko razdoblje zastupljeno većim brojem uzoraka.

Kad se govori o budućnosti ^{14}C i arheologije, treba se spomenuti mogući napredak u oba područja. Najveća mogućnost širenja ^{14}C metode datiranja vidi se u primjeni AMS tehnike mjerenja, prvenstveno zbog toga što je potrebna količina uzorka oko 1000 puta manja nego za klasične radiometrijske tehnike (GPC i LSC). Stoga postoji puno veća mogućnost dobivanja "dobrog" uzorka, te novih materijala koji se u klasičnom smislu nisu mogli koristiti (ostaci žita u keramičkim posudama - nema problema asocijacije, komadić tkiva s mumije, komadić platna). AMS tehnika omogućava veći broj datiranih uzoraka, veću maksimalnu starost (do 60 000 godina), te nešto bolju preciznost mjerenja. Da bi arheolozi imali i stvarne koristi od razvoja ^{14}C AMS tehnike, potrebno je, osim samog razvoja te tehnike (što rade fizičari i kemičari) promijeniti i način razmišljanja arheologa, prije svega uvođenjem ^{14}C u studij, zatim način istraživanja, pa i način iskopavanja i obrade artefakata - ono što se dosad bacalo tijekom pripreme materijala za izlaganje, sada se može efikasno datirati AMS ^{14}C tehnikom (komad tkiva na sjekiri, 2-3 zrna žita u posudi).