

Bu makale aşağıda atf bilgisi verilen makalenin Türkçe çevirisidir.

Atıf bilgisi: Doğan, T., İlkmen, E., Kulak, F. 2023. TÜBİTAK 1MV Accelerator Mass Spectrometer Designed for ^{14}C , ^{10}Be , ^{26}Al , ^{41}Ca , ^{129}I . Bulletin of the Mineral Research and Exploration 172, 81-91. <https://doi.org/10.19111/bulletinofmre.1228878>



Maden Tetkik ve Arama Dergisi

<http://dergi.mta.gov.tr>



^{14}C , ^{10}Be , ^{26}Al , ^{41}Ca , ^{129}I için Tasarlanan TÜBİTAK 1MV Hızlandırıcı Kütle Spektrometresi

TÜBİTAK 1MV Accelerator Mass Spectrometer Designed for ^{14}C , ^{10}Be , ^{26}Al , ^{41}Ca , ^{129}I

Turhan DOĞAN^{a*}, Erhan İLK MEN^a ve Furkan KULAK^a

^aTÜBİTAK, Marmara Araştırma Merkezi, Gebze, Kocaeli, Türkiye

Araştırma Makalesi

Anahtar Kelimeler:

Radyokarbon,
Radyokarbon
Tarihlendirme,
Hızlandırıcı Kütle
Spektrometresi,
Hızlandırılmış Kütle
Spektroskopisi.

ÖZ

1 MV Hızlandırıcı Kütle Spektrometresi (AMS/HKS) Aralık 2015'te TÜBİTAK, MRC Türkiye'de kurulmuştur. 1MV TÜBİTAK AMS/HKS sistemi, 1.1MV'a kadar çalışan bir Pelletron tandem hızlandırıcıya dayanmaktadır. National Electrostatics Corporation (NEC) tarafından üretilen sistemin tasarımı, üretim süresi boyunca benzersiz olmuştur. TÜBİTAK 1MV AMS/HKS, yine NEC tarafından üretilen XCAMS 0.5MV AMS/HKS'nin tasarımına dayanmaktadır, ancak daha yüksek enerjili bir tandem hızlandırıcıya sahiptir. Daha yüksek enerjili hızlandırıcı, ^{10}Be ölçümleri için daha iyi hassasiyete (%1 veya daha az) sahiptir. Bu yeni AMS/HKS ayrıca XCAMS'den daha büyük mıknatıslara sahiptir. Daha büyük mıknatıslar, iki düğümlü gaz iyonizasyon dedektöründe ^{41}Ca ve ^{129}I ölçümlerini mümkün kılmaktadır. Bu makalede, teknik özellikler; iyon kaynağı parametreleri, terminal ve diğer işlemler ve ölçüm kalitesi, beş izotopik oran, $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$, $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$, $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$, $^{41}\text{Ca}/^{40}\text{Ca}$, $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ için başarılı performans için açıklanmaktadır. $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ oranı ölçüm kalite kontrolü için beş yıllık veriler de sunulmuştur.

Geliş Tarihi: 10.05.2022

Kabul Tarihi: 02.01.2023

Keywords:

Radiocarbon,
Radiocarbon Dating,
Accelerator Mass
Spectrometer, Accelerated
Mass Spectroscopy.

ABSTRACT

A 1 MV Accelerator Mass Spectrometer (AMS) was installed at TÜBİTAK, MRC Türkiye in December 2015. The 1MV TÜBİTAK AMS system is based on a Pelletron tandem accelerator, operating up to 1.1MV. Built by National Electrostatics Corporation (NEC), its design was unique during production time. The TÜBİTAK 1MV AMS is based on the design of an XCAMS 0.5MV AMS also produced by NEC, but with a higher energy tandem accelerator. The higher energy accelerator features better precision (1% or less) for ^{10}Be measurements. This new AMS also has larger magnets than the XCAMS. Larger magnets make it possible to measure ^{41}Ca and ^{129}I at the two-anode gas-ionization detector. In this article, the technical features; the parameters of ion source, terminal and other operations, and measurement quality are explained for accomplished performance of the five isotopic ratios, $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$, $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$, $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$, $^{41}\text{Ca}/^{40}\text{Ca}$, $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$. The five years of data for $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratio measurement quality control are represented as well.

*Başvurulacak yazar: Turhan DOĞAN, turhandogan@hotmail.com

1. Giriş

Türkiye'deki ilk AMS/HKS tesisi 2016 yılında Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) Marmara Araştırma Merkezi'nde (MAM) kurulmuştur. Laboratuvarın adı (Türkiye) Ulusal 1 MV Hızlandırılmış Kütle Spektroskopisi Laboratuvarı'dır (Doğan vd., 2021). 2016 yılından bu yana uluslararası ticari radyokarbon analizi sağlayan laboratuvar, Orta Doğu ve Balkanlar'daki iki AMS/HKS laboratuvarından biridir. Türkiye'de ve bölgede arkeoloji, yer bilimleri, çevre bilimleri ve kriminoloji alanlarında radyonüklit analizlerine olan yüksek talep göz önünde bulundurulduğunda, Türkiye'nin ilk ve tek AMS/HKS laboratuvarı hem yerel hem de uluslararası taleplere cevap vermeyi amaçlamaktadır. 1MV AMS/HKS sistemini içeren laboratuvarın kuruluşu, Türkiye Cumhuriyeti Kalkınma Bakanlığı tarafından ulusal kaynaklarla finanse edilmektedir.

TÜBİTAK 1MV AMS/HKS sistemi, National Electrostatic Corporation (NEC) tarafından Pelletron tandem hızlandırıcı teknolojisi kullanılarak tasarlanmış ve üretilmiştir. Universal AMS/Evrensel HKS sistemi, NEC'in çoklu tür ölçümleri için tasarladığı ilk 1MV AMS/HKS sistemidir. Bu makalede, ^{14}C , ^{10}Be , ^{26}Al , ^{40}Ca ve ^{129}I 'yi tespit edebilen 1MV Hızlandırıcı Kütle Spektrometresi olan UAMS/EHKS sisteminin benzersiz tasarımı açıklanmaktadır. Sistemin bileşenlerine genel bir bakış da yer almaktadır. Teknik özellikler: İyon kaynağı parametreleri, terminal ve diğer işlemler ve ölçüm kalitesi, beş izotopik oranın ($^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$, $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$, $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$, $^{41}\text{Ca}/^{40}\text{Ca}$, $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$) başarılı performansı için açıklanmaktadır. $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ oranı ölçüm kalite kontrolü için beş yıllık veriler de sunulmuştur.

1.1 AMS Sistem Odası

AMS Sistem odası, AMS'nin sorunsuz çalışmasını sağlamak için çok önemli bir unsurdur. AMS sisteminin kurulduğu odanın yeterli olmaması ölçüm kalitesini doğrudan etkileyebilir. AMS sistem odası, AMS kuruluma gönderilmeden önce kurulum için kapsamlı bir şekilde hazırlanmıştır. Oda zemininin ± 1 cm'den daha az eğimli olduğu kontrol edilmiş ve zemin betonu ağır AMS ağırlığını taşıyacak şekilde hazırlanmıştır. Geçtiğimiz 5 yıl içinde zeminde herhangi bir çökme gözlemlenmemiştir. Zeminde oluşacak herhangi bir eğim AMS'nin hizalamasını etkileyecektir. Hem AMS sistemi hem de soğutma suyu soğutucu ünitesi,

minimum gürültü ile elektrik besleyen bir dizel jeneratör ve 160 KVA UPS içeren sabit bir özel AC güç kurulumuna sahiptir. Yüksek elektrik gürültüsü AMS parçalarında kusurlara yol açabilir veya ömürlerini kısaltabilir. AMS'yi istikrarlı bir şekilde çalıştırmak için gereken diğer önemli şeyler temiz basınçlı hava, filtrelenmiş soğutma suyu, kontrollü hava sıcaklıkları ve odanın düşük yoğuşma noktasıdır. Odanın nem ve sıcaklığındaki dalgalanmalar kararsız AMS ölçümlerine neden olabilir. TÜBİTAK AMS odası, $20 \pm 1^\circ$ civarında sabit bir oda sıcaklığı ve $15'$ in altında bir yoğuşma noktası sağlayacak şekilde donatılmıştır. Bu parametreler odanın etrafındaki 8 noktada sürekli olarak izlenmektedir. Beş yıllık operasyonun ardından, yukarıda belirtilen tüm parametreler sıkı bir şekilde korunmaktadır.

Oda ayrıca 7,4 m x 4 m boyutlarındaki TÜBİTAK 1MV AMS sistemini barındıracak ve hizmet verecek kadar büyüktür (Şekil 1).

2. AMS Sistemlerinin Geliştirilmesi ve TÜBİTAK 1MV AMS Sistemi

AMS sistemleri son kırk yılda önemli dönüşümler geçirmiştir. Nadir izotopların AMS ile ölçülebileceği gösterildikten sonra, mevcut bazı hızlandırıcı sistemleri modifiye edildi ve ölçümler yapıldı. Ölçümler çoğunlukla yüksek talep gören radyokarbon üzerinde yoğunlaştı. 1980'lerde birden fazla izotopu ölçebilen yüksek enerjili hızlandırıcılar kullanılmaya başlandı (Synal ve Wacker, 2010). Bu ilk aşamayı takiben, radyokarbon ölçümü için ayrılmış 1MV veya daha az hızlandırıcıya sahip daha düşük enerjili modeller tanıtıldı (Synal vd., 2000). AMS sistemlerinin ticari olarak kullanılabilirliği daha yaygın hale geldi. Şimdi, karbon için özel 0,2 MV AMS sistemleri bulunmaktadır (Schroeder vd., 2004; Synal vd., 2007). Ayrıca, düşük enerjili hızlandırıcıya sahip AMS sistemlerinin ^{10}Be , ^{14}C , ^{26}Al ve ^{41}Ca gibi çoklu izotop sistemleri için yeterli olduğu kanıtlanmıştır (Klein vd., 2006; Zondervan vd., 2015; Macková vd., 2021). Son zamanlarda, düşük enerjili hızlandırıcılara sahip sistemler rutin ölçümler için daha fazla tercih edilir hale gelmiştir. AMS sistemlerine yapılan bazı küçük eklemeler, daha düşük enerjilerde izobarları ortadan kaldırarak ölçüm yapılmasına olanak tanıyan tekniklerin geliştirilmesini sağlamıştır. Önemli bir örnek, nadir Berilyum izotoplarının 0,5 MV terminal voltajlarına kadar düşük enerjilerde ölçülebilmesi



Şekil 1- TÜBİTAK AMS laboratuvarındaki AMS sistemi.

için Si_3N_4 enerji düşürücü folyonun kullanılmaya başlanmasıdır (Müller vd., 2008). Bu nedenle, Türkiye'nin ilk AMS sisteminin kavramsallaştırılması ve birden fazla izotopu ölçebilmek için bu model üzerinde tasarlanmıştır ve gelecekte daha da geliştirilmesi amaçlanmaktadır. TÜBİTAK 1MV AMS sistemi modeli bir NEC 3SDH-1 UAMS'dir. UAMS, XCAMS tasarımına dayanan daha gelişmiş bir sistemdir ve bu da NEC'in radyokarbon özel kompakt AMS sistemlerine (CAMS) dayanmaktadır (Southon vd., 2004).

TÜBİTAK 1MV AMS donanım özellikleri XCAMS ile karşılaştırıldığında ilk göze çarpanlar 1MV hızlandırıcı ve daha büyük mıknatıslardır. TÜBİTAK 1MV AMS, radyokarbon dışında nadir berilyum, alüminyum ve kalsiyum izotoplarının yanı sıra iyot 129 ölçümü de yapabiliyor. 1MV hızlandırıcı, XCAMS'a kıyasla Berilyum ölçümleri için hassasiyette önemli bir gelişme sağlamaktadır (Zondervan vd., 2015). Ayrıca, daha büyük mıknatıslar kalsiyum ve iyot izotoplarının ölçümlerine de olanak sağlamaktadır. Aslında TÜBİTAK 1MV AMS sistemi sadece yukarıda belirtilen türleri ölçmek üzere sipariş edilmişti. Ancak üretim sırasında sisteme iyot ölçüm

kabiliyetinin de eklenmesini talep ettik. TÜBİTAK 1MV AMS, izobar ayırma filtrelerindeki teknolojik gelişmelerle birlikte daha fazla türün ölçülebilmesi için modifiye edilebilir. Örneğin, 5 MV veya daha yüksek terminal voltajına sahip AMS sistemleri ^{36}Cl 'yi ölçülebilir, ancak verimli izobar ayırmayı genişletmek için yapılan son girişimler, daha düşük enerjilerde ölçülmesini vaat etmektedir (Martschini vd., 2011).

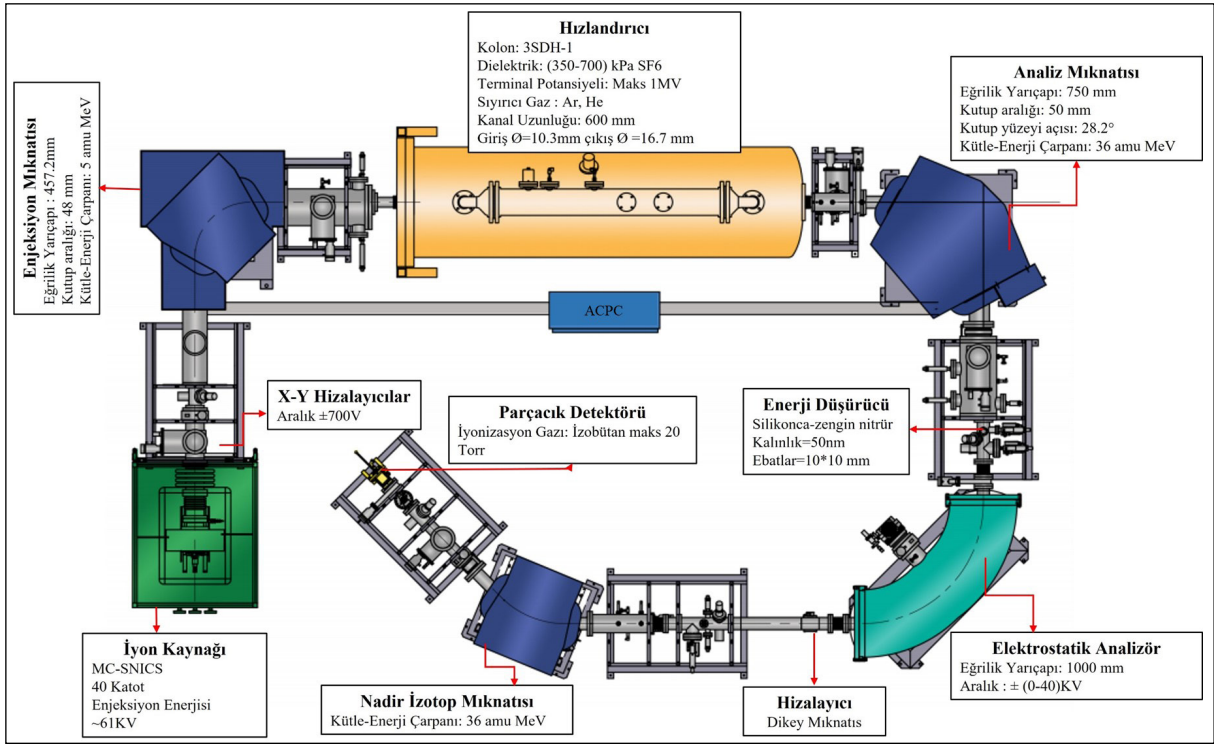
1MV AMS sisteminin yerleşimi ve bileşenlerin detayları Şekil 2'de verilmiştir.

2.1. İyon kaynağı

TÜBİTAK 1MV AMS Çok Katotlu Negatif İyon Kaynağı (MC-SNICS) 40 adede kadar katı örnek alabilir. Negatif iyonlar 61 kV'luk bir potansiyel ile hızlandırılır. İyon kaynağı, iyon kaynağından hemen sonra bulunan ilk Faraday kabında ölçülen 100 mikroamperlik akımlar üretir. Her bir izotop için iyon kaynağı parametreleri Çizelge 1'de verilmiştir.

2.2. Enjeksiyon Hattı Bölümü

Bir X/Y yönlendiricisi iyon kaynağından sonra ve ilk Faraday kabından hemen önce bulunmaktadır.



Şekil 2- 1MV AMS sisteminin yerleşimi ve bileşenlerin detayları.

Çizelge 1- Her bir izotop için iyon kaynağı parametreleri tabloda verilmiştir.

İzotop Oranı	¹⁰ Be/ ⁹ Be	¹⁴ C/ ¹² C	²⁶ Al/ ²⁷ Al	⁴¹ Ca/ ⁴⁰ Ca	¹²⁹ I/ ¹²⁷ I
Katod	6,00 kV	6,00 kV	6,00 kV	6,00 kV	4,00 kV
Odaklama Merceği	5,65 kV	5,60 kV	5,60 kV	5,77 kV	3,33 kV
Ekstraktör	15,00 kV	15,00 kV	15,00 kV	15,00 kV	18,00 kV
Odak	0,96 kV	0,8 kV	0,8 kV	0,00 kV	0,96 kV
Bias	41 kV	41 kV	52 kV	42 kV	37 kV
İyonlaştırıcı	23 A	23 A	22 A	23 A	23 A

Bu izotopa özgü yönlendiriciler, ışının şeklini X ve Y yönünde gösteren ilk ışın profili monitörü (BPM) yardımıyla enjeksiyon hattı bölümü boyunca ışını ayarlamak için kullanılır. Bu, UAMS sistemindeki ilk BPM'dir ve Faraday kabının ardından yalıtım boşluğundan önce yerleştirilmiştir. Yalıtım boşlukları mıknatısın görüntü ve nesne noktasındadır. 90° bükülen mıknatısa bağlı mıknatıs öngerilim kaynağı (MBS) sıralı enjeksiyon yapar. Karbon analizi durumunda, bol miktarda bulunan ¹²C ve ¹³C iyonları sırasıyla her 1800 ms ve 10000 ms'de bir Faraday kaplarına entegre edilirken, nadir bulunan ¹⁴C iyonları 90000µs boyunca Gaz İyonizasyon Dedektörüne enjekte edilir (Doğan vd., 2021). Bu döngü yaklaşık

10 Hz'lik bir tekrarlama hızıyla devam eder. Her iyon türü için enjeksiyon süreleri Çizelge 2'de verilmiştir.

Mıknatıstan sonra, bir iyon demeti bir kerede Pelletron hızlandırıcıdan enjekte edilir. Mıknatıs ve kütle hızlandırıcı arasında, bol miktarda bulunan izotop(lar)ı ölçmek için dengelenmiş Faraday kapları bulunmaktadır. Enjeksiyon mıknatısı veya düşük enerji mıknatısı 457 mm yarıçapa sahiptir. Mıknatıstan sonra iki adet eksen dışı Faraday kabı bulunmaktadır. Birincisi ¹²C, ¹³C, ⁹Be, ⁴⁰Ca ve ¹²⁷I için kullanılırken diğeri ²⁷Al için kullanılır. Hızlandırıcı tankına girişten hemen önce yarıklar yerleştirilmiştir.

Sıralı enjeksiyon AMS sistemine avantajlar getirmektedir. 3SDH hızlandırıcıdaki bol izotoplardan

Çizelge 2- İyon türlerine göre enjeksiyon süreleri tabloda verilmiştir.

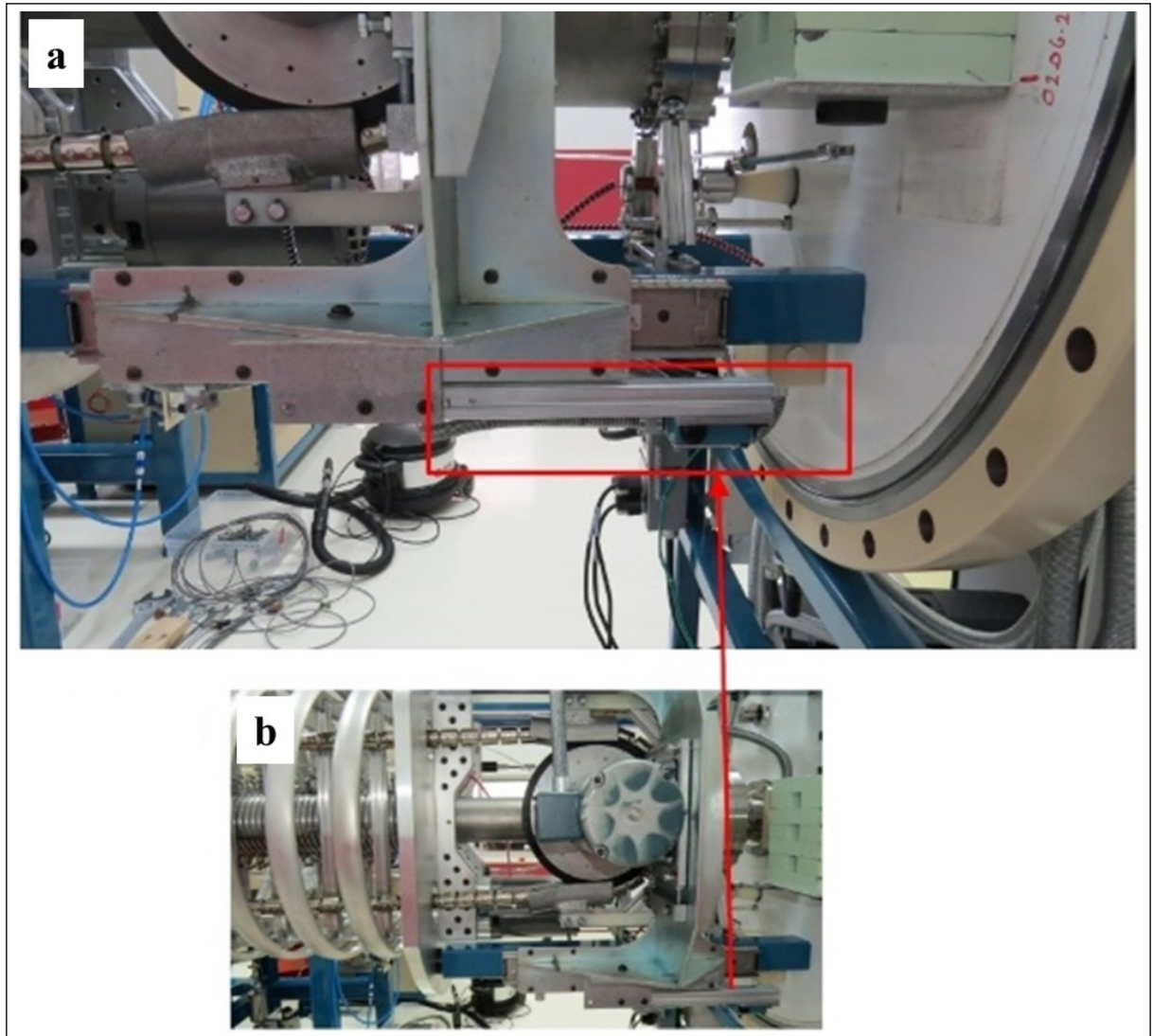
Ölçülen İyon	¹⁴ C	¹³ C	¹² C	¹⁰ Be (BeO ⁻)	⁹ Be (BeO ⁻)	²⁶ Al	²⁷ Al	⁴¹ Ca (CaF ₃ ⁻)	⁴⁰ Ca (CaF ₃ ⁻)	¹²⁹ I	¹²⁷ I
Enjeksiyon Süresi (milisaniye)	90	10	1,8	1	99	1	99	100	1	1	99

gelen ortalama akım küçük kalır. Bu, önemli miktarda bol izotop akımlarının kullanılmasına izin vererek verimi ve ölçüm hassasiyetini en üst düzeye çıkarır, ancak aynı zamanda hızlandırıcı yükünü en aza indirir.

2.3. 1MV Hızlandırıcı

Tek yük halindeki iyon demeti, kütle spektrometresinin yüksek enerji kısmı boyunca

gerekli enerji dağılımını elde etmek için maksimum 2,2 MeV'e kadar hızlandırılır. Hızlandırma tüplerinden hemen önce hızlandırma tankına bir Einzel lensi yerleştirilmiştir. Güvenli operasyonlar için kilitler dahil edilmiştir. Bu sisteme bir zincir durdurucu da monte edilmiştir (Şekil 3). Zincir çok fazla gerilirse zincir motorunu durdurma fırsatı verir. Zincirin aşırı ve beklenmedik şekilde gerilmesi tanktaki mekanik



Şekil 3- a) Zincirin aşırı gerilmesi durumunda hızlandırıcı tankının içinde hasar oluşmasını önlemek için zincir durdurucu mekanizma yerleştirilmiştir. b) Zincir durdurucu mekanizmanın hızlandırıcı tankındaki konumu.

parçaların hasar görmesine neden olabilir. 0,5MV'de hızlandırıcı çalışması için 50 psi SF₆ gazı yeterlidir. Ancak, 1,1 MV terminal geriliminde tam gradyanda çalışma için 80 PSI gereklidir. SF₆ gazı, gazı mümkün olduğunca saf tutmak için sürekli olarak filtrelenecek ve ısı eşanjörü ile soğutulacak şekilde tank içinde dolaştırılır.

Moleküler ayrışma, hızlandırıcı tarafından yüksek gerilim terminalinin içine yerleştirilmiş iki şişeden Helyum ve Argon arasından seçilebilen sıyrıcı gaz aracılığıyla gerçekleştirilir. Sıyrıcı gaz kaynağı, tankın dışına yerleştirilen bir seçici düğme ile Helyum ve Argon arasında manuel olarak geçiş yapacak şekilde yapılandırılmıştır. Sıyrıcı basıncı, uzun bir lucite çubuk aracılığıyla tank kafasındaki bir step motora bağlı olan yüksek voltaj terminalindeki bir ölçüm valfi ile uzaktan ayarlanır. Karbon ve alüminyum ölçümleri sırasında Argon kullanılırken Berilyum, Kalsiyum ve İyot için Helyum tercih edilir (Doğan vd., 2021). Sıyrıcı kanal farklı şekilde pompalanır ve iki adet 300 l/dak turbo pompa ile argon veya helyumu devridaim ettirir.

Terminalin her iki tarafında iki adet 22 aralıklı hızlandırma tüpü bulunmaktadır. Gerilim derecelendirmesi her bir boşluk boyunca 550 MOhm dirençler ile sağlanır.

Terminal kararlılığı terminal potansiyelinin %0,05'inden daha iyidir, bu da 1 MV'de terminal voltajında 500V'tan daha az bir değişim olduğunu gösterir. Kayıp yük 0,4 mikro amperin altında sabittir. Şarj zincirini ve jeneratör motorunu kontrol etmek için hızlandırıcı tankının dışına iki VFD yerleştirilmiştir. Zincirdeki herhangi bir gerilmeyi veya kıvılcımı dışarıdan izlemek için tankın üst kısmına cam bir görüş alanı yerleştirilmiştir.

Odak ayarlamaları, hızlandırıcının içindeki elektrik alan gradyanını bir kısa devre çubuğu ile değiştirerek mümkündür. Bu sayede 3SDH Pelletron Hızlandırıcı 0,2 MV ila 1,1 MV arasındaki terminal potansiyellerinde çalıştırılabilir. Terminaldeki optimum terminal enerjisi ve ölçülen izotoplara özgü parametreler Çizelge 3'te verilmiştir.

2.4. Mıknatıs Analizi

Hızlandırıcının çıkışından sonra ışın ayarlama sırasında kullanılan bir Faraday kabı yerleştirilmiştir. Tasarım sınırlaması nedeniyle, bu ışın hattı kabında bir bastırıcı yoktur. Bu özellik sistemdeki diğer Faraday kaplarından farklıdır. Ayrıca analiz mıknatısından önce ışın şekillendirme ve odaklama için kullanılan bir elektrostatik kuadropol üçlüsü bulunmaktadır.

Çizelge 3- Elemente göre optimum terminal enerjisi ve parametreleri tabloda verilmiştir.

Nadir İzotop	¹⁰ Be	¹⁴ C	²⁶ Al	⁴¹ Ca	¹²⁹ I
Kaynak Çıkışı (A)	1,034x10 ⁻⁰⁶	5,234x10 ⁻⁰⁵	4,143x10 ⁻⁰⁷	1,685x10 ⁻⁰⁷	4,581x10 ⁻⁰⁶
Terminal Voltajı (MV)	1,10	0,46	0,57	1,10	0,50
İyon Yükü	1	1	1	5	3
Transmisyon	56,300%	41,050%	21,190%	0,002%	ölçülmez
Boş Ölçüm	9,88 x10 ⁻¹⁶	2,50 x10 ⁻¹⁶	2,12 x10 ⁻¹⁵	1,72 x10 ⁻¹¹	8,68 x10 ⁻¹⁵
Boş Ölçüm için Kullanılan Malzeme	Boş	Ftalik Anhidrit	Boş	Boş	Woodward
Standart Malzeme	NIST	NIST SRM 4990C (Ox-II)	KN-4-1	Nishiizumi vd., 2000	n/a
Standart Oranı	2,6775x10 ⁻¹²	1,4202x10 ⁻¹²	6,5727x10 ⁻¹¹	9,291x10 ⁻⁰⁹	1,5578x10 ⁻¹²
Standart Sapma (%)	%0,535	%0,080	%0,226	%0,705	%0,573
Nadir İzotop (Enjekte edilen)	¹⁰ Be ⁺ (BeO ⁻)	¹⁴ C ⁺ (C ⁻)	²⁶ Al ⁺ (Al ⁻)	⁴¹ Ca ⁺⁵ (CaF ₃ ⁻)	¹²⁹ I (¹²⁹ I ⁻)

Analiz mıknatısı 75 cm yarıçapa, 50 mm kutup aralığına ve $ME/Z^2=36$ amu-MeV değerine sahiptir. Bu, Karbon ve Berilyumdan daha yüksek kütlelerin bükülmesine izin verir. Böylece ^{41}Ca ve ^{129}I gibi ağır izotoplar gaz iyonizasyon dedektörüne ulaşabilir.

Hızlandırmadan sonra, analiz eden mıknatıs ilgilenilen izotopları ayırır ve bol miktarda bulunan referans izotopları analiz eden mıknatısın görüntü noktasındaki eksen dışı Faraday kaplarına gönderir. Ayrıca, nadir izotoplar nadir izotop ışın hattında ilerler. Dijital örnekleme devresine sahip hızlı, hassas, geçişli akım entegratörleri bol izotopların akımlarını ölçer.

^{12}C , ^{13}C , ^9Be , ^{40}Ca , ^{27}Al alanlarının ölçüldüğü 3 eksen dışı Faraday kabı bulunmaktadır. ^{10}Be ölçümleri için bir aktüatör aracılığıyla 75 nm'lik bir enerji düşürücü Silikon Nitrür folyo yerleştirilmiştir. Biraz farklı durdurma güçleri nedeniyle, dedektördeki ^{10}B izobar sayımları ^{10}Be sayımlarından ayrılabilir.

Bol miktarda bulunan ^{127}I izotopu için ölçüm düşük enerji tarafındaki Faraday kabında yapılır. Herhangi bir izobara sahip olmadığından, düşük enerji tarafındaki ölçüm verilerini kullanmak mümkündür.

2.5. Elektrostatik Analizör

UAMS boyunca ikinci BPM, ESA'dan önce yerleştirilmiştir, bu da yüksek enerjili mıknatıstan sonra ışının şeklini ve yönünü kontrol etmeyi mümkün kılmaktadır. ESA, XCAMS'a kıyasla daha uzun bir uçuş yolu sağlayan 100 cm'lik bir yarıçapa sahiptir. ESA elemanları karbon ölçümleri için sırasıyla +40 kV ve -40 kV civarında tutulmaktadır. Elektrostatik analizör iyonları enerjiye göre ayırır ve istenmeyen iyonların nihai nadir izotop dedektörüne ulaşmasını

engeller. Üçüncü filtre, ESA'dan önce ince bir durdurucu folyo ile birlikte 45° 'lik bir mıknatıs, ^{10}B izobarını ^{10}Be 'den ayırmak için gereklidir. ESA'dan sonra ışının Y yönünde ayarlanmasını mümkün kılan bir manyetik yönlendirici yerleştirilmiştir. UAMS'deki üçüncü BPM, ESA ve yönlendirici mıknatıstan sonra ışının izlenmesini ve ayarlanmasını mümkün kılmıştır. Ayrıca 45 derecelik mıknatıstan hemen önce bir kuadropul bulunmaktadır.

2.6. 45° Derecelik Mıknatıs

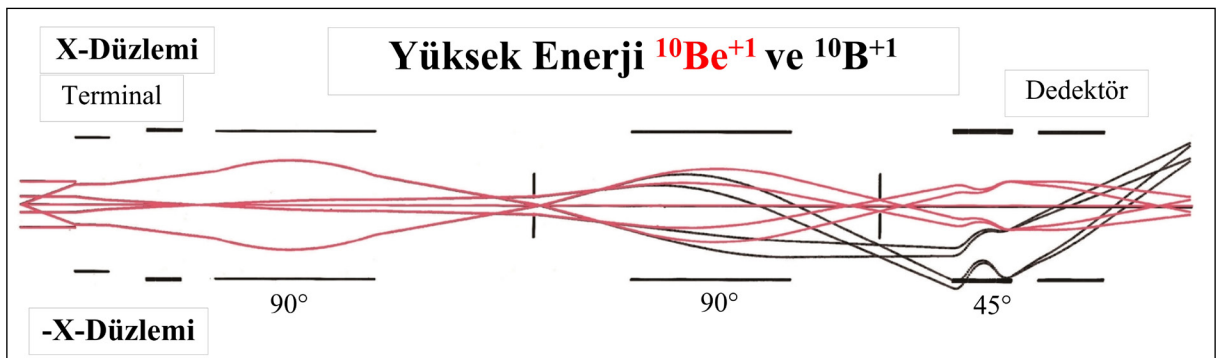
$^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ oranlarını hassas bir şekilde ölçmek için 45° çift odaklamalı mıknatıs çok önemlidir. Dedektörden önce 45° 'lik bir mıknatısa ek olarak, ESA'dan önce ince, çıkarılabilir, sıyrıcı bir folyo yerleştirilir. Bu folyodan geçen bazı türler bir elektron daha kaybederek çift yüklü $^{10}\text{Be}^{2+}$ iyonlarının karışan $^{10}\text{B}^{2+}$ iyonlarından biraz daha yüksek enerjiye sahip olmasına neden olur (Şekil 4). Sonuç olarak, bu izobarları gaz iyonizasyon dedektöründe ayırmak mümkün hale gelir.

2.7. Nadir İzotop Dedektörü

Son BPM dedektörden hemen önce yerleştirilir ve dedektörden önceki son yoğun ışın yörüngesini izlemeye ve ayarlamaya yarar.

TÜBİTAK 1MV UAMS sistemi, nadir izotopları sayımlardan "geçitli" olabilen kalan girişimlerden ayırmak için iki plakalı kompakt bir GİC (gaz iyonizasyon sayacı) kullanır.

Dedektör, darbe şekillendirme ve amplifikasyon için NİM amplifikatörlerine bağlanan ön amplifikatörlere bağlanır. Çıkış, girişim iyonlarından kaynaklanan arka planı en aza indirmek için bir



Şekil 4- Çift odaklama mıknatısında iyon demeti profili.

XIA Pixie-4 4 kanallı analog-dijital dönüştürücüye gönderilir. Sıçrayan ışın sisteminden gelen zamanlama sinyalleri tipik olarak çıkış sinyalini çakışma sinyaliyle birlikte geçitlemek için kullanılır. Bu, bol miktarda izotopun hızlandırıldığı ve ölçüldüğü kısa süreler boyunca artefaktları sayma olasılığını ortadan kaldırmaktadır.

2.8. Kontrol Bölümü

Tüm NEC AMS sistemlerinde olduğu gibi, AccelNET kontrol sistemi PC'leri Scientific Linux üzerinde çalışmaktadır. Scientific Linux üzerindeki ikinci bir bilgisayar, sonuçların normalleştirilmesi ve değerlendirilmesi için çevrimdışı analiz yazılımı ABC yazılımını çalıştırmaktadır.

3. Sistem Performansı

Rutin Karbon ölçümü için TÜBİTAK 1MV AMS'nin çalışma parametreleri Çizelge 4'te verilmiştir. Saha kabul testlerinde beş izotopun tümü için sistematik testler gerçekleştirilmiştir. Beş izotop için tüm kabul gereklilikleri karşılanmıştır. Sistem ağırlıklı olarak karbon ölçümleri için kullanılacağından, çeşitli IAEA standartları ölçülmüş ve konsensüs değerleriyle karşılaştırılmıştır (Çizelge 5). Ölçülen pMC değerlerinin IAEA konsensüs

değerleri üzerindeki grafiği 0,99587'lik bir uyuma sahiptir.

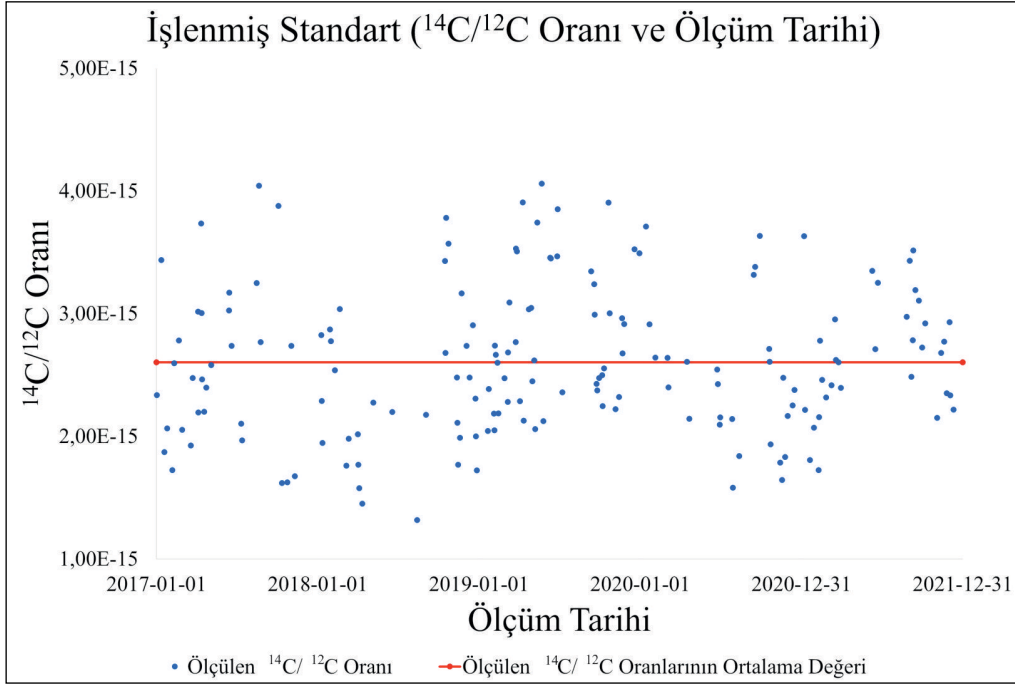
Radyokarbon ölçümleri laboratuvar kurulduğundan beri düzenli bir şekilde devam etmektedir. 14C/12C oranı ölçüm kalite kontrolü için beş yıllık veriler, SRM 4990C (Ox-II), IAEA-C7, IAEA-C8 standart referans materyalleri ile işlenmiş (Phthalic anhydride C₈H₄O₃, Sigma Aldrich 320064) ve işlenmemiş (Alfa Aesar graphite powder natural, briquetting grade 100 mesh, 99,9995%) için zaman serisi grafikleri sunulmuştur (Şekiller 5, 6, 7, 8, 9). Standart referans materyallerin %1'den daha az belirsizlikle ölçülmesi üzerine çalışılmaktadır. Düşük belirsizlik seviyesinin sağlanması, TÜBİTAK ölçüm koşulu için en önemli parametre olmuştur. Grafit üretim sürecinin kimyası ve iyon kaynağının temiz tutulması belirsizlik değerlerinde en önemli etkenlerdir. Toplam 15 gün (360 saat) çalıştıktan sonra iyon kaynağının temizlenmesi gerekmektedir. İyon kaynağını temizlemek için AMS'nin bu kısmındaki iyonlaştırıcı, daldırma merceği ve diğer bileşenler sökülmelidir. Genellikle, Kimwipe™ ve saf su ve etanol ile temizlenir. İyonlaştırıcının yüzeyinde oluşan kabuk miktarına bağlı olarak, iyonlaştırıcı ve daldırma merceği ile birlikte bir kumlama makinesi kullanılabilir.

Çizelge 4- TÜBİTAK 1MV AMS sisteminin rutin karbon ölçümü için çalışma parametreleridir.

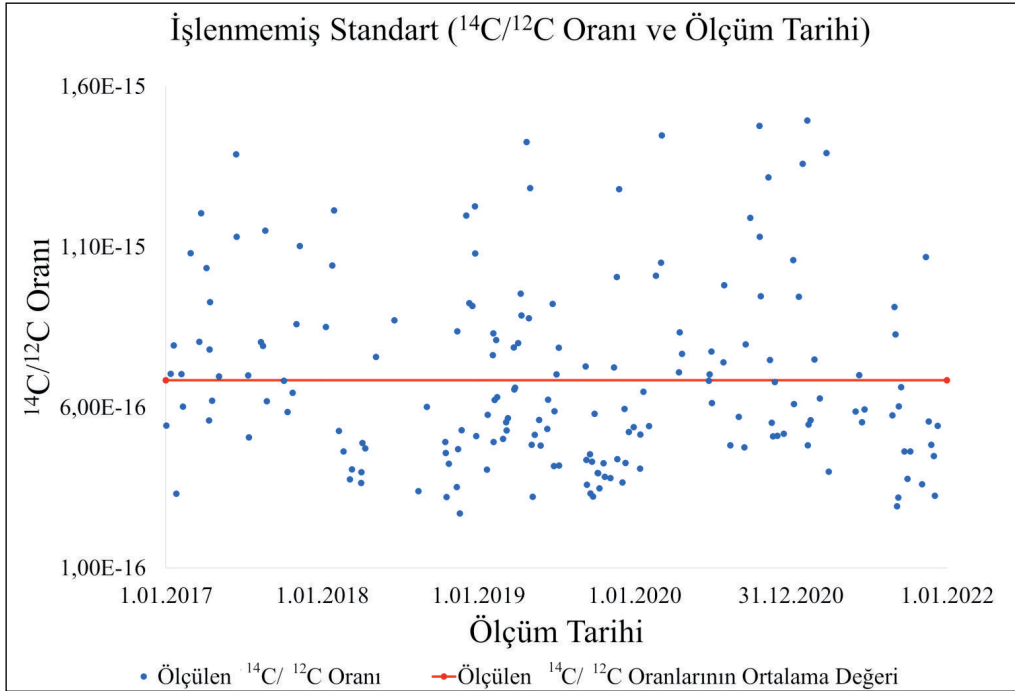
AMS'nin Kısmı	Parametre	Değer, Birim
İyon Kaynağı	Demet Akımı Demet Enerjisi	50-60 µA 61 keV
Enjeksiyon Miknatısı	Alan MBS	0,29T 10,683 kV 5,090 kV 0,200 kV
Hızlandırıcı	Terminal Voltajı Argon Çarpışma Gazı Basıncı	0,460 MV 0,06 mbar
Analiz Miknatısı	Alan	0,72T
Faraday Kaplar	¹² C Demeti ¹³ C Demeti	2,149x10 ⁻⁰⁵ A 2,341x10 ⁻⁰⁷ A
Elektrostatik Analizör	Levha Voltajı	39,78 kV, -39,78 kV
¹⁴ C Detektörü	OXII Sayım Hızı	~ 10000 cpm

Çizelge 5- 2015 yılında kabul testleri sırasında yapılan ön ölçümler için IAEA Standartları ile Karbon sonuçlarının uyumluluğu verilmiştir. *Son beş yılda grafit üretiminden kaynaklanan kontaminasyonu ortadan kaldırarak 0,00-0,05 pMC olarak konsensüs değere daha yakın bir sonuç için iyileştirilmiştir. **Ölçüm öncesi asit baz asit (ABA) ile protokolü uygulandığında 0,22±0,03 pMC olarak ölçülmüştür (Doğan vd., 2023).

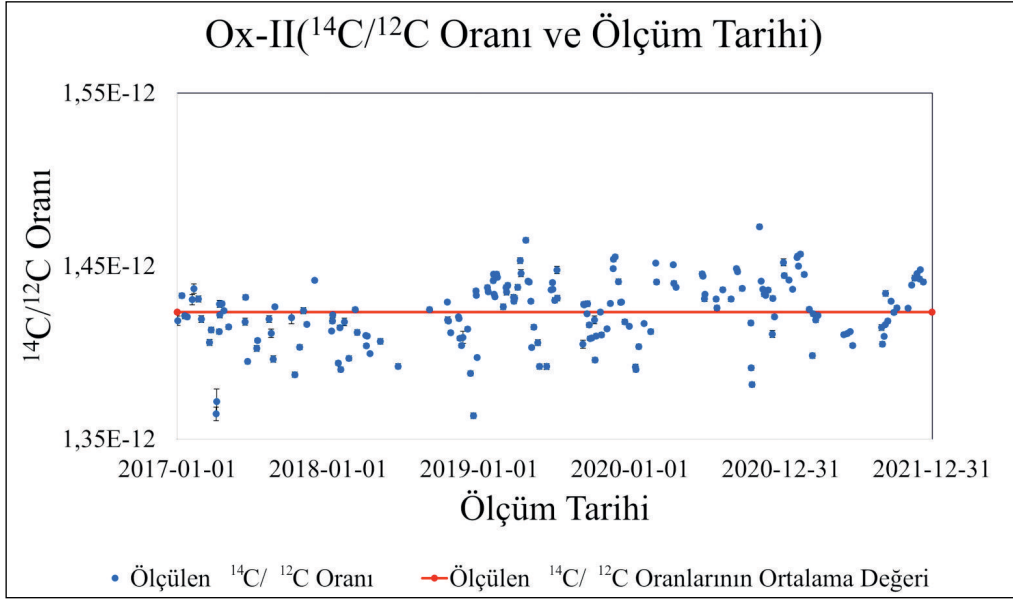
Standart Referans Malzeme	Konsensüs Değeri (pMC)	Ölçülen Değer (pMC)
IAEA C1	0±0,02	0,136*±0,08
IAEA C2	41,14	41,61±0,22
IAEA C3	129,41	128,95±0,51
IAEA C4	0,20 - 0,44	0,30±0,07
IAEA C5	23,05	23,05±0,12
IAEA C7	49,53	49,51±0,17
IAEA C8	15,03	15,01±0,07
IAEA C9	0,12 - 0,21	0,39**±0,03



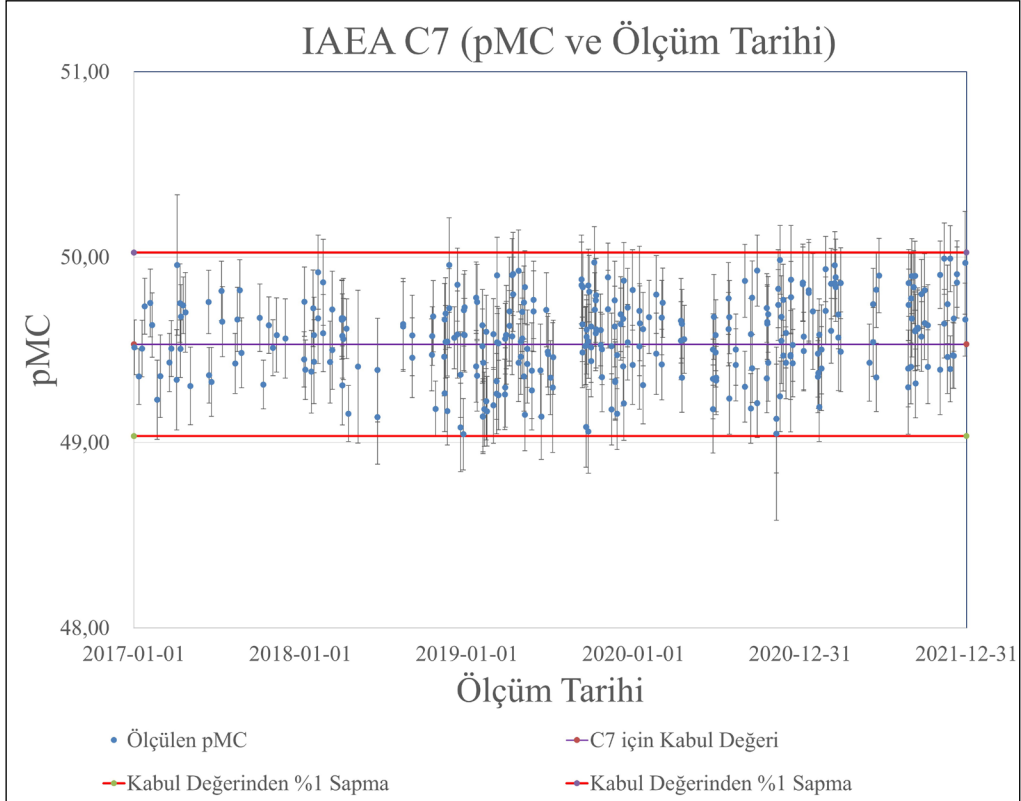
Şekil 5- $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ oranı ölçüm kalite kontrolü için kullanılan beş yıllık veri, işlenmiş standart için şekilde gösterilmiştir. (Ftalik anhidrit $\text{C}_8\text{H}_4\text{O}_3$, Sigma Aldrich 320064). $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ oranının ortalama değeri $2,60 \times 10^{-15}$ olarak ölçülüyor. Bu değer artması kimya laboratuvarında prosesten kaynaklanan bir kirlilik olarak kabul edilir.



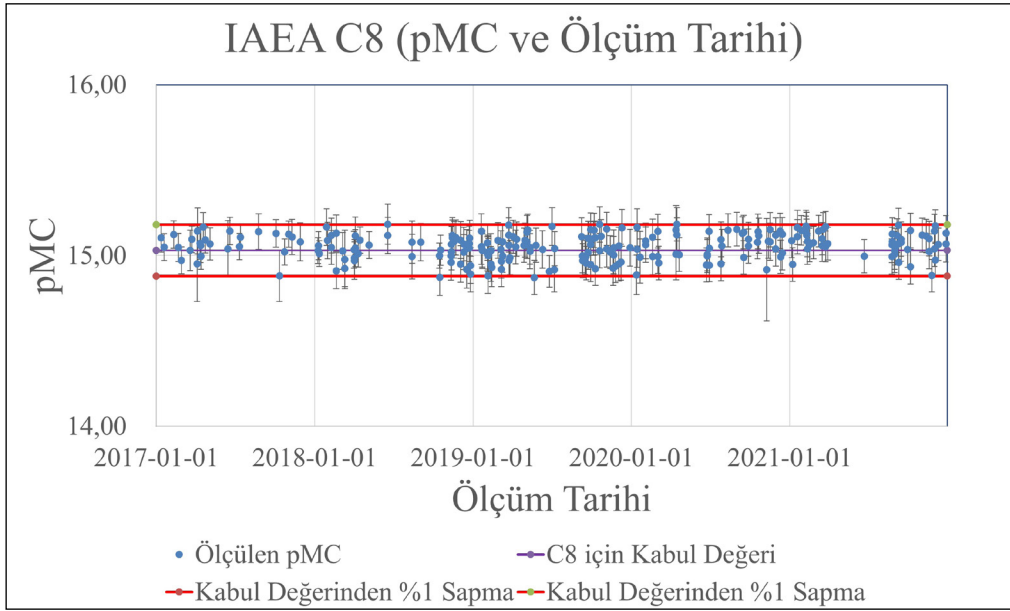
Şekil 6- $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ oran ölçümü kalite kontrolü için beş yıllık veriler işlenmemiş satandard için sonuçlar şekilde gösterilmiştir. (Alfa Aesar grafit tozu doğal). $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ oranının ortalama değeri $6,85 \times 10^{-16}$ olarak ölçülüyor. Bu değer artması, genellikle kirli iyon kaynağı nedeniyle AMS'de arka plan ^{14}C 'deki artış olarak kabul edilir.



Şekil 7- ¹⁴C/¹²C oranı ölçüm kalite kontrolü için beş yıllık veri, standart referans malzeme SRM 4990C (Ox-II) için gösterilmiştir. ¹⁴C/¹²C oranının ortalama değeri $1,42 \times 10^{-15}$ olarak ölçülüyor. Bu değerdeki değişimin sebebinin iyon kaynağı parçalarının değiştirilmesi ile ilişkili olduğu görülmektedir.



Şekil 8- ¹⁴C/¹²C oranı ölçüm kalite kontrolü için beş yıllık veri, standart referans malzeme IAEA-C7 için şekilde verilmiştir. ¹⁴C/¹²C oranının ortalama değeri 49,57 pMC olarak ölçülüyor ve bu da konsensus değeri olan 49,53 pMC'ye çok yakın bir değerdir. IAEA-C7 için maksimum %1 sapma, ölçümün kalite kontrolünden geçtiği olarak kabul edilir.



Şekil 9 - $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ oranı ölçüm kalite kontrolü için beş yıllık veri, standart referans malzeme IAEA-C8 için şekilde verilmiştir. $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ oranının ortalama değeri 15,05 pMC olarak ölçülüyor ve bu da konsensüs değeri olan 15,03 pMC'ye çok yakın bir değerdir. IAEA-C8 için maksimum %1 sapma, ölçümün kalite kontrolünden geçtiği olarak kabul edilir.

4. Sonuç

Aralık 2015'te 1 MV tandem Pelletron'a dayalı yeni bir AMS sistemi kurulmuş ve kabul edilmiştir. Bu UAMS beş farklı izotopu ölçmek üzere tasarlanmış ve üretilmiştir. Tüm standart ve arka plan izotopik oranları konsensüs değerleri ile uyumludur. Sistem doğrulandıktan ve onaylandıktan sonra düzenli çalışma prosedürleri uygulanmıştır. Laboratuvar şu anda dünyanın dört bir yanından getirilen numuneler üzerinde rutin ölçümler gerçekleştirmektedir. TÜBİTAK AMS Laboratuvarı, tüm Orta Doğu ve Balkanlar'daki sadece üç AMS laboratuvarından biri olması nedeniyle bu bölgedeki çalışmaları ve bilimsel çalışmalara verdiği destek açısından çok önemlidir (Doğan vd., 2023).

Değinen Belgeler

- Doğan, T., İlkmen, E., Kulak, F. 2021. A new national 1 MV AMS laboratory at TÜBİTAK MRC in Turkey. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms 509, 48-54.
- Doğan, T., İlkmen, E., Kulak, F. 2023. Radiocarbon Analysis And Status Report From Türkiye: 1MV National AMS Laboratory (TÜBİTAK-AMS). Radiocarbon (accepted).

Klein, M. G., Mous, D. J. W., Gott dang, A. 2006. A compact IMV multi-element AMS system. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms 249, 764-767.

Macková, A., Malinský, P., Cutroneo, M., Havránek, V., Voseček, V., Flaks, J., Semián, V., Vonka, L., Zach, V., Bém, P., Běhal, R., Čihák, M., Mrázek, J., Krist, P., Poklop, D., Štefánik, M., Štursa, J., Olšanský, V., Chvátíl, D., Kučera, J., Němec, M., Světlík, I., Kameník, J., Tecl, J. 2021. Small accelerators and their applications in the CANAM research infrastructure at the NPI CAS. The European Physical Journal Plus 136, 558.

Martschini, M., Forstner, O., Golser R., Kutschera W., Pavetich S., Priller, A., Steier P., Suter M., Wallner A. 2011. Recent advances in AMS of ^{36}Cl with a 3-MV-tandem. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms 269 (24), 3188-3191.

Müller, A. M., Christl, M., Döbeli, M., Kubik, P. W., Suter, M., Synal H. A. 2008. ^{10}Be AMS measurements at low energies ($E < 1\text{MeV}$). Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms 266 (10), 2207-2212.

- Nishiizumi, K., Caffee, M. W., DePaolo D. J. 2000. Preparation of ^{41}Ca AMS standards. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* 172 (1-4), 399-403.
- Schroeder, J., Hauser, T., Klody, G., Norton, G. 2004. Initial Results with Low Energy Single Stage AMS. *Radiocarbon* 46 (1), 1-4.
- Southon, J. R., Santos dos, G. M., Druffel-Rodriguez, K. C., Druffel, E. R. M., Trumbore, S., Xu, X., Maya Mazo M., Ali S., Mazon M. 2004. The Keck Carbon Cycle AMS Laboratory, University of California, Irvine; initial operation and a background surprise. *Radiocarbon* 46, 41-49.
- Synal, H. A., Wacker, L. 2010. AMS measurement technique after 30 years: Possibilities and limitations of low energy systems. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* 268, (7-8) 701-707.
- Synal, H. A., Jacob, S., Suter, M. 2000. The PSI/ETH small radiocarbon dating system. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* 172, 1-7.
- Synal, H. A., Stocker, M, Suter, M. 2007. MICADAS: A new compact radiocarbon AMS system. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* 259 (1),7-13.
- Zondervan, A., Hauser, T. M., Kaiser, J., Kitchen, R. L., Turnbull, J. C., West J. G. 2015. XCAMS: The compact ^{14}C accelerator mass spectrometer extended for ^{10}Be and ^{26}Al at GNS Science, New Zealand. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* 361, 25-33.