

## $k_0$ -INAA METODU İLƏ YÜKSƏK TƏMİZLİKLİ NANOKRİSTAL TİTAN KARBİDİN (TiC) İZ ELEMENTLƏRİNİN TƏDQIQI

RAİSƏ R. HAXIYEVA

*Azərbaycan Respublikası Elm və Təhsil Nazirliyinin Radiasiya Problemləri İnstitutu,*

*Az1143, B. Vahabzadə 9, Bakı, Azərbaycan*

*E-mail: raisahaxiyeva@yahoo.com*

Titan karbid (TiC) nanohissəcikləri TRIGA Mark II tipli tədqiqat reaktorunda neytron seli ( $2 \times 10^{13} \text{ n/sm}^2\text{s}$ ) ilə şüalanmışdır. Neytron şüalanmasından sonra nanokristal TiC-dəki iz elementlərin radioizotopları zaman funksiyası olaraq öyrənilmişdir. Neytron şüalanmasının nəticəsində nümunələrin aktivliyini əhəmiyyətli dərəcədə artıran izotopların identifikasiyası aparılmışdır. Nanokristal TiC standart lazer texnikası ilə sintez edilmiş və nümunələrin təmizliyi  $k_0$ -əsaslı Instrumental Neytron Aktivasiya Analizi ( $k_0$ -INAA) metodu ilə müəyyən edilmişdir. TiC nanohissəciklərində iz elementlərin konsentrasiyası müvafiq elementlərin radionuklidləri vasitəsilə təyin edilmişdir. İz element izotoplarının konsentrasiyası  $k_0$ -INAA metoduna uyğun olaraq faizlə hesablanmışdır.

**Açar sözlər:** nano TiC, nanomaterial, radioaktivlik, neytron aktivasiya analizi, neytron şüalanması.

**DOI:** 10.70784/azip.2.2024409

### 1. Giriş

Titan karbid nüvə və kosmik texnologiyalarında böyük əhəmiyyət kəsb edən materiallardan biridir. Buna görə də, müasir dövrdə nanoölçülülü TiC və onun müxtəlif tərkib hissələri tədqiqatçılar tərəfindən həm nəzəri, həm də praktik olaraq öyrənilməyə başlanmışdır [1-5]. Titan karbid (TiC) özünəməxsus fiziki, fiziki-kimyəvi xüsusiyyətləri və radiasiya dayanıqlılığı sayəsində elmin və texnikanın müxtəlif sahələrində geniş istifadə olunur [6-9]. Yüksək temperatura davamlılıq, xüsusi quruluş, mexaniki dayanıqlıq və aşağı oksidləşmə potensialı TiC-in tətbiq sahəsini nüvə və kosmik material kimi artırır [10-12]. TiC-in mükəmməl mexaniki və funksional xüsusiyyətlərinin birləşməsi onu müasir elektronika sahəsində yarımkeçirici kimi tətbiq etməyə əsas yaradır. TiC-in 10-dan çox poliptipi mövcuddur. Elektron sistemlərində ən çox istifadə edilənlər isə həndəsi altıbucaqlı politiplərdir. Nano TiC geniş qadağan olunmuş zonası, istilik və elektrik xüsusiyyətlərinə görə mikroelektronika sahəsində nanohissəcik kimi istifadə olunur [13-15]. Buna görə də, bu işdə bütün təcrübələrdə TiC nanohissəcikləri ( $h$ -TiC kimi də tanınır) istifadə edilmişdir.

Sintez edilmiş materialların müxtəlif texnologiyalarda tətbiq imkanları birbaşa onların təmizliyindən asılıdır. Bu günə qədər sintez edilmiş materialların təmizliyi bir sıra metodlar və vasitələrlə artırılmaqdadır. Nanomaterialların texnologiyalarda tətbiq imkanlarını genişləndirmək məqsədilə onların təmizliyini artırmaq istiqamətində intensiv tədqiqatlar aparılır [16-19]. Bu işdə standart lazer metodu ilə sintez edilmiş nanokristal TiC, neytron seli ( $2 \times 10^{13} \text{ n/sm}^2\text{s}$ ) ilə 20 saata qədər şüalanmışdır. TiC nanomaterialının izotoplarının aktivlikləri və "soyuma müddəti" (360 saata qədər) asılılığı, neytron şüalanmasından sonra parçalanma üçün tələb olunan vaxt öyrənilmişdir. Nəticələrə əsasən titan karbid nanomaterialında qarışıqların keyfiyyət və kəmiyyət identifikasiyası aparılmışdır. Hazırda 99-99.9% təmizlikdə olan nano titan karbid yüksək təmizlikli TiC nanomaterialı hesab edilir və bu təmizliyə sahib nümunələr geniş tətbiq olunur.

Təcrübələrə əsasən, nanomaterialın təmizliyi 99.5+% olduğu və yüksək təmizlikli TiC nanomaterialı kimi qəbul edilə biləcəyi müəyyən olunmuşdur. Lakin 0.5%-dən az olan qarışıq başlanğıcda əhəmiyyətsiz kimi görünür, amma bu, nanoskalada və atomik tərkibdə vacibdir. Beləliklə, əgər 1 qram TiC nanotozundakı hissəciklərin atomik səviyyədə təxmini olaraq  $10^{22}$  olduğu qəbul edilsə, onda 0.5%-in (təxminən  $10^{20}$  qarışıq hissəcik) nə qədər böyük olduğunu anlamaq olar. Həqiqətən, 0.5%-lik qarışıq nümunənin fiziki parametrlərinə çox az təsir edir, amma bu qarışıq reaktor şüalanmasında özünü açıq şəkildə göstərir və onların strukturunun araşdırılması çox vacibdir. Beləliklə, təcrübədə istifadə olunan nümunələrin aktivliyi bu qarışıqın radioizotoplarının təsiri nəticəsində təxminən 1 GBq-ə çatmışdır. Bu halda, nümunələrin aktivliyi azalmayana qədər (təxminən 360 saat sonra) digər təcrübələrin aparılması mümkün deyil [20-23]. Təqdim olunan bu işdə aktiv izotoplar və onların standart azalma əyriyələri verilmişdir.

### 2. Təcrübə

Təcrübədə istifadə edilən nanomaterial 50 m<sup>2</sup>/q xüsusi səth sahəsi (SSA), 40 nm ölçülü və sıxlığı 0.08q/sm<sup>3</sup> (həqiqi sıxlıq 4.93 q/sm<sup>3</sup>) olan kub titan karbid (US 2052) nanohissəcikləridir. Təcrübələrdə istifadə olunan nümunələr, Sloveniyanın Lyublyanada yerləşən Jožef Stefan İnstitutunun "Reaktor Mərkəzi"ndəki TRIGA Mark II yüngül su hovuz tipli araşdırma reaktorunun tam güc rejimində (250 kVt) neytron seli (kanal A1,  $2 \times 10^{13} \text{ n/sm}^2\text{s}$ ) ilə şüalanmışdır. Tam güc rejimində kanal A1-də neytron seli üçün parametrlər aşağıdakılardır: termal neytronlar üçün  $5.107 \times 10^{12} \text{ n/sm}^2\text{s}$  ( $1 \pm 0.0008$ ,  $E_n < 625 \text{ eV}$ ), epitermal neytronlar üçün  $6.502 \times 10^{12} \text{ n/sm}^2\text{s}$  ( $1 \pm 0.0008$ ,  $E_n \sim 625 \text{ eV} \pm 0.1 \text{ MeV}$ ), sürətli neytronlar üçün  $7.585 \times 10^{12} \text{ n/sm}^2\text{s}$  ( $1 \pm 0.0007$ ,  $E_n > 0.1 \text{ MeV}$ ) və nəhayət, bütün neytronlar üçün  $1.920 \times 10^{13} \text{ n/sm}^2\text{s}$  ( $1 \pm 0.0005$ ) [24, 25].

$k_0$ -INAA üçün, təxminən 0.051q SiC nanohissəcik şəklində olan bir alikvot təmiz polietilen ampulaya

(SPRONK sistemi, Lexmond, Niderland) bağlanmışdır. Qısa ömürlü radionuklidləri müəyyən etmək üçün alikvot və standart Al-0.1% Au (IRMM-530R) birlikdə yığılmış, polietilen şüşədə sandviç strukturunda möhkəmləndirilmiş və TRIGA reaktorunun karusel qurğusunda  $1.1 \times 10^{12} \text{ n} \cdot \text{sm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  termal neytron seli ilə 5 dəqiqə şüalanmışdır. Uzun ömürlü radionuklidləri müəyyən etmək üçün alikvot və standart Al-0.1% Au yuxarıdakı şəkildə hazırlanmış və TRIGA reaktorunun CF-də 12 saat müddətində şüalanmışdır.

Qısa şüalanmadan sonra (5 dəqiqə), alikvot 6, 25 və 180 dəqiqə soyuma vaxtından sonra tam kalibrlanmış HPGe detektorunda (45% nisbi səmərəlilik) ölçülmüşdür. Uzun şüalanmadan sonra (12 saat), alikvot 2, 7 və 28 gün soyuma vaxtından sonra eyni HPGe detektorunda ölçülmüşdür. Pik sahəsinin qiymətləndirilməsi üçün HyperLab 2002 proqramı istifadə edilmişdir. Element konsentrasiyalarını hesablamaq üçün  $f=27.11$  (termal və epitermal neytron axını nisbəti) və  $\alpha=-0.0042$  (epitermal neytron axınının ideal 1/E bölgüsündən sapması) dəyərləri istifadə edilmişdir. Element konsentrasiyaları və effektiv bərk bucaqların hesablanması üçün Kayzero for Windows proqram paketindən istifadə olunmuşdur.  $k_0$ -INAA üçün keyfiyyətə nəzarət (QA/QC) məqsədləri ilə BCR-320R kanal çöküntüsü istifadə edilmişdir (nəticələr sertifikatlaşdırılmış qiymətlərlə birgə təqdim olunur).

Digər fiziki təcrübələr üçün nanokristallik TiC xüsusi alüminium silindrdə 20 saata qədər şüalanmışdır. TiC nanohissəcikləri,  $\rho$  (powder) = 0,08 q/sm<sup>3</sup> sıxlığına (qablarda sıxlıq təxminən ~0.1 q/sm<sup>3</sup>) və təxminən ~1,28 q kütləyə malik olub xüsusi formada şəkilləndirilmişdir və parametrləri aşağıdakı kimidir:  $\rho(\text{tablet}) \sim 4.9 \text{ q/sm}^3$ ,  $V(\text{tablet}) \sim 0.4 \text{ sm}^3$ ,  $S(\text{tablet}) \sim 4.5 \text{ sm}^2$ . Nümunələr  $2 \times 10^{13} \text{ n/sm}^2$  saniyə neytron seli intensivliyi ilə şüalanmışdır. Araşdırılan nümunələrin (toz və tablet formalarında) udma dozası dəyəri, həndəsi ölçülər, şüalanma intensivliyi, şüalanma müddətləri, neytron seli təsirinin sıxlığı və neytronların energetik spektrləri əsasında müəyyən edilmişdir. Tablet şəklində olan nümunələr üçün neytron seli  $1,3338 \times 10^{17} \div 2,6676 \times 10^{18}$  neytron/tablet intervallarında dəyişir.

Neytronların qarşılıqlı təsiri nəticəsində nano TiC-də yaranan radionuklidlər "Ortec HPGe detektorları (Koaksial, Aşağı və Well-Tip)" və "Canberra koaksial HPGe detektoru" spektrometrik cihazlarında analiz edilmişdir. Şüalanmış nümunələrin radioaktivliyi, izotop tərkibi və qarışıq elementlərin konsentrasiyaları [17, 20, 26] metodikasına əsasən müəyyən edilmişdir.

### 3. Nəticə və müzakirələr

Neytron şüalanması nəticəsində nanomaterialda yeni həyəcənlanmış radioaktiv nüvə yaranmışdır. Əgər bu radioaktiv nüvələrin başlanğıc sayını  $N$  olaraq qəbul etsək, nüvələrin sayı aşağıdakı uyğunluğa əsasən azalmağa davam edir nəticədə radioaktiv parçalanma baş verir:

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N \quad (1)$$

burada,  $\lambda$  parçalanma sabitidir. Tənlik (1)-i sadələşdirərək aşağıdakı bərabərlik əldə edə bilərik:

$$\ln N = -\lambda t + C \quad (2)$$

Əgər başlanğıcda ( $t = t_0$ ) radioaktiv izotopların sayını  $N_0$  olaraq qəbul etsək, tənlik (2)-ni aşağıdakı kimi yazı bilərik:

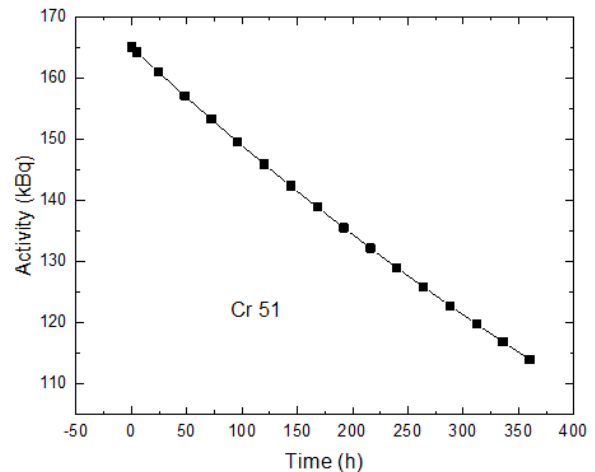
$$\begin{aligned} \ln N &= -\lambda t + \ln N_0 \\ \ln \left( \frac{N}{N_0} \right) &= -\lambda t \\ N &= N_0 \exp(-\lambda t) \end{aligned} \quad (3)$$

Sonuncu tənlik eksponensial radioaktiv parçalanma tənliyidir. Yarımparçalanma periodu ( $t_{1/2}$ ) aşağıdakı tənliklərə əsasən hesablanır:

$$\begin{aligned} \frac{N}{N_0} &= 0.5 = \exp\left(-\lambda t_{1/2}\right) \\ t_{1/2} &= \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda} \end{aligned} \quad (4)$$

Radioaktiv izotopların identifikasiyası gamma spektroskopiyaya metoduna əsasən araşdırılmışdır. Gamma spektrində nüvə parçalanması ilə uyğun gələn  $\gamma$  şüası intensivliyi şüalanma dövrü və parçalanma sabitlərinə görə fərqlənir.

Şəkil 1 neytron şüalanmasından dərhal sonra təxminən 170 kBq aktivlik göstərən ən yüksək ölçülən aktivliklə TiC nanohissəcik nümunəsinin aktivlik profilini təsvir edir. Bu aktivlik, yaranmış radioizotopların parçalanma xüsusiyyətlərini öyrənmək üçün 360 saat (15 gün) müddətində izlənmişdir. Şəkil zamanla azalan aktivliyi vurğulayır, bu da nümunədə yaranan izotopların radioaktiv parçalanma proseslərini əks etdirir.



Şəkil 1. 360 saat ərzində induksiya edilmiş radioizotopların parçalanmasını göstərən ən yüksək ilkin aktivliyə (170 kBq) malik <sup>51</sup>Cr-nin aktivlik profili.

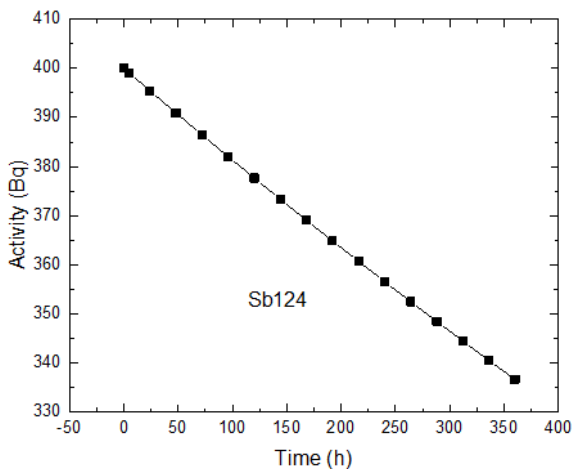
Bu tədqiqatda əsas nəticə, müşahidə olunan aktivliyə əsasən xrom-51 (<sup>51</sup>Cr) izotopunun əsas iştirakçı

olaraq müəyyən edilməsi olmuşdur. Bu izotop, TiC nanohissəciklərindəki xromun iz element olaraq mövcudluğu nəticəsində yaranmışdır və onun konsentrasiyası təxminən 0.001% təşkil edir. <sup>51</sup>Cr izotopu təxminən 27.7 gün yarımparçalanma peioduna malikdir, bu da onun aktivlik parçalanma əyrisinin ilkin fazasında mühüm iştirakçı olmasına səbəb olur. Onun parçalanması, asanlıqla aşkar edilə və ölçülə bilən gamma şüalarının yayılması ilə idarə olunur, bu da izotopun zamanla davranışı haqqında vacib məlumatlar təqdim edir.

Şəkil, aktivliyin ilkin kəskin azalmasını göstərir, bu da əsasən <sup>51</sup>Cr izotopunun parçalanması və digər qısa müddətli izotopların (ola bilsin ki, iz miqdarda mövcud olan) parçalanması ilə əlaqələndirilir. Müşahidə müddəti irəlilədikcə, aktivliyin azalma tempi daha mülayim olur ki, bu da <sup>51</sup>Cr-in təsirinin azaldığını və uzun müddət davam edən izotopların (əgər varsa) mövcudluğunu göstərir. Bu parçalanma əyrisindəki dəyişiklik, neytronlarla şüalanmış materiallarda tipikdir, çünki müxtəlif yarım parçalanma müddəti olan izotoplar ümumi aktivliyə təsir göstərir.

TiC nanohissəciklərində <sup>51</sup>Cr-in mövcudluğu və parçalanması, hətta son dərəcə aşağı konsentrasiyalarda belə, iz elementlərinin şüalanmış materialların radioloji davranışını müəyyən etmədəki vacib rolunu vurğulayır. Bu parçalanma əyrilərinin tədqiqi, materialın qısa müddətli sabitliyi və radioloji təhlükəsizliyi haqqında dəyərli məlumatlar təqdim edir. Bundan əlavə, belə məlumatlar, TiC nanohissəciklərinin təmizliyini və performansını optimallaşdırmaq üçün vacibdir, xüsusən şüalanmaya məruz qalan mühitlərdə, məsələn nüvə reaktorları və ya aerokosmik sistemlərdə istifadə üçün.

Ümumilikdə, şəkil 1-də təqdim olunan nəticələr, irəliləmiş materiallarda iz elementlərinin düzgün şəkildə müəyyən edilməsi və kəmiyyətləşdirilməsinin vacibliyini göstərir. Həmçinin, neytron şüalanması və parçalanma analizinin TiC kimi materialların xüsusiyyətlərini nanosəviyyədə xarakterizə etməkdəki faydasını göstərir və yüksək şüalanma mühitləri üçün hazırlanmış materialların inkişafına töhfə verir.



Şəkil 2. TiC nanozərrəciklərinin aktivlik profili (<sup>124</sup>Sb-nin (400 Bq, 0.02% konsentrasiya) 360 saat ərzindəki təsirini göstərir)

Şəkil 2-də, TiC nanohissəciklərindən alınan nümunənin aktivlik əyrisi təqdim olunur, burada antimonyum-124 (<sup>124</sup>Sb) izotopuna xüsusi diqqət yetirilmişdir.

Bu izotop, nümunədə orta səviyyəli aktivliyə səbəb olur. <sup>124</sup>Sb izotopunun aktivliyi təxminən 400 Bq ölçülmüşdür ki, bu da ən yüksək aktivlik izotopu olan <sup>51</sup>Cr ilə müqayisədə əhəmiyyətli, lakin orta səviyyəli bir aktivlikdir. Bu izotop, TiC nanohissəciklərində antimonyumun iz element olaraq mövcudluğu nəticəsində yaranmışdır və onun konsentrasiyası təxminən 0.02%-dir.

60.2 günlük yarımparçalanma dövrü ilə <sup>124</sup>Sb, daha qısa yarımparçalanma dövrü olan izotoplarla müqayisədə daha yavaş parçalanır və bu da aktivliyin zamanla tədricən azalmasına səbəb olur. Bu daha yavaş parçalanma aktivlik profilində aydın şəkildə müşahidə olunur. Burada <sup>124</sup>Sb-nin ümumi aktivliyə verdiyi təsir, <sup>51</sup>Cr kimi qısa yarımparçalanma dövrləri olan izotoplara nisbətən daha sabit şəkildə azalır. <sup>124</sup>Sb izotopunun zamanla davranışı, neytron şüalanmasından sonra 360 saat (15 gün) ərzində diqqətlə izlənmiş və bu dövr ərzində onun radioloji davranışı barədə geniş bir baxış təmin edilmişdir.

Şəkildə təqdim olunan məlumatlar, <sup>124</sup>Sb-nin TiC nanozərrəciklərinin orta müddətli radioloji profilinin formalaşmasındakı rolunu vurğulayır. Əvvəlki aktivlik qısa yarımparçalanma dövrü olan izotoplar tərəfindən üstünlük təşkil etsə də, <sup>124</sup>Sb-nin mövcudluğu aralıq mərhələlərdə getdikcə daha əhəmiyyətli hala gəlir, bu da şüalanmış materialların ümumi radioaktiv parçalanmasında iz elementlərinin vacibliyini ön plana çıxarır. Bu izotopik davranış, TiC kimi materialların radioloji xüsusiyyətlərini və stabilliyini qiymətləndirərkən, xüsusilə uzunmüddətli şüalanma təsirinə məruz qaldığı tətbiqlərdə iz elementlərinin konsentrasiyalarını diqqətlə nəzərə almağın vacibliyini göstərir.

Ümumilikdə, şəkil 2, <sup>124</sup>Sb-nin TiC nanozərrəciklərinin parçalanma dinamikasına verdiyi töhfəni göstərir və iz elementlərinin aşağı konsentrasiyalarda şüalanmış materialların radioloji xüsusiyyətlərinə zamanla necə əhəmiyyətli təsir göstərə biləcəyini nümayiş etdirir. 360 saat ərzində aparılan tədqiqat, TiC nanozərrəciklərinin neytron şüalanması altında orta müddətli stabilliyini və xüsusi izotopların radioloji profilə təsirini anlamaq üçün dəyərli məlumatlar təqdim edir.

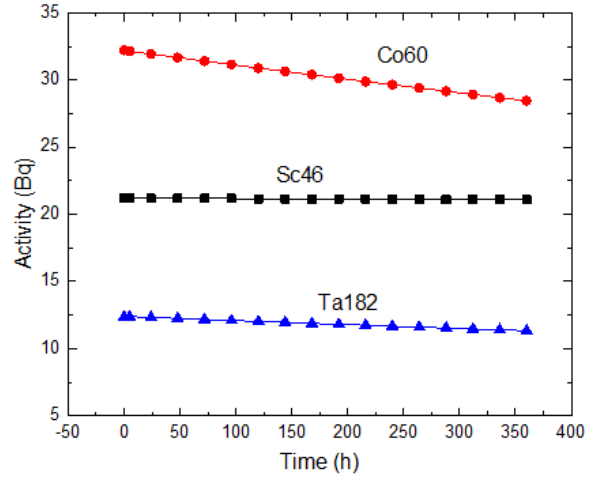
Şəkil 3, tədqiqatda araşdırılan digər nümunələrlə müqayisədə nisbətən aşağı radioloji aktivliklə xarakterizə olunan TiC nanozərrəcik nümunəsinin aktivlik profilini göstərir. Bu nümunədə müəyyən edilən izotoplar kobalt-60 (<sup>60</sup>Co), skandium-46 (<sup>46</sup>Sc) və tantalum-181 (<sup>181</sup>Ta) olub, müvafiq aktivlikləri müvafiq olaraq 35 Bq, 20 Bq və 15 Bq-dir. Bu izotoplar, <sup>60</sup>Co üçün 0.001%, <sup>46</sup>Sc üçün 0.09% və <sup>181</sup>Ta üçün 0.4% iz elementlərinin konsentrasiyalarına uyğun gəlir.

Bu iz elementlərinin aşağı konsentrasiyalarına baxmayaraq, onların radioaktiv təsirləri aşkar edilə bilər, baxmayaraq ki, bu təsirlər aşağı səviyyələrdədir. Bu nümunədə müşahidə olunan nisbətən aşağı aktivlik, <sup>51</sup>Cr və ya <sup>124</sup>Sb kimi daha yüksək aktivlik səviyyələrinə sahib nümunələrlə müqayisədə minimal radioloji təsir göstərir. Bu xüsusiyyət, nümunəni minimal şüalanma təsirinin istənilməli və ya tələb olunduğu tətbiqlər üçün uyğun edir. Aktivlik profili 360 saat (15 gün) ərzində izlənilib və izotopların parçalanma davranışının detallı şəkildə izlənməsinə imkan yaradılıb. <sup>60</sup>Co, <sup>46</sup>Sc və <sup>181</sup>Ta üçün müşahidə olunan nisbətən aşağı

aktivlik, uzun yarımparçalanma dövrünə sahib izotopların mövcudluğunu göstərir və bu da zamanla radioloji aktivliyin daha tədricən azalmasına səbəb olur.

Nəticə olaraq, şəkil 3, aşağı aktivlikli nümunələrlə tədqiqatda digər nümunələr arasında vacib bir müqayisə təqdim edir və iz elementlərinin şüalanmış TiC nanozərrəciklərinin ümumi radioloji profilinin formalaşmasındakı rolunu vurğulayır. Nümunənin aşağı aktivliyi, məhdud radioloji təsirləri göstərir, bu da aşağı şüalanma səviyyələrinin üstünlük təşkil etdiyi və ya tələb olunduğu xüsusi tətbiqlər üçün, məsələn, həssas mühitlərdə və ya uzunmüddətli saxlanma şəraitində dəyərli olduğunu göstərir.

Cədvəl 1, TiC nanozərrəcik nümunələrində mövcud olan aktiv radioizotopların, tutulmuş neytronların və sabit izotopların konsentrasiyalarının ətraflı xülasəsini təqdim edir. Cədvəldə, neytron şüalanması ilə aktivləşdirilmiş izotoplar, onların müvafiq aktivlikləri və nümunədəki iz elementlərinin konsentrasiyaları haqqında ətraflı məlumat verilmişdir.



Şəkil 3. 360 saat ərzində <sup>60</sup>Co (35 Bq, 0,001%), <sup>46</sup>Sc (20 Bq, 0,09%) və <sup>181</sup>Ta (15 Bq, 0,4%) ilə aşağı aktivlik göstərən TiC nanohissəciklərinin aktivlik profili

Cədvəl 1.

TiC nanozərrəciklərində aktiv radioizotopların, tutulan neytronların və sabit izotopların konsentrasiyaları.

Sabit İzotop	Radioizotop	Hər bir nüvədə tutulan neytron sayı	İz elementlərinin konsentrasiyası (mq/kg)	Elementlərin konsentrasiyaları (%)
<sup>16</sup> ( <sup>17</sup> , <sup>18</sup> )O	<sup>19</sup> O	+1 (+3)	5000	0.5
<sup>27</sup> Al	<sup>28</sup> Al	+1	1500	0.15
<sup>24</sup> ( <sup>25</sup> , <sup>26</sup> )Mg	<sup>27</sup> Mg	+1 (+3)	450	0.045
<sup>181</sup> Ta	<sup>182</sup> Ta	+1	900	0.09
<sup>45</sup> Sc	<sup>46</sup> Sc	+1	75	0.0075
<sup>58</sup> Fe, <sup>59</sup> Co	<sup>60</sup> Co	+1(2)	10	0.001
<sup>123</sup> Sb	<sup>124</sup> Sb	+1	20	0.02
<sup>50-52</sup> Cr, <sup>51</sup> V	<sup>51</sup> Cr	+1	10	0.001

Qeyd etmək önəmlidir ki, nümunə daxilində çox kiçik yaşama müddətinə malik izotopların konsentrasiyası nisbətən çoxdur (ümumilikdə təqribən 0,7%). Bu izotoplar <sup>19</sup>O, <sup>28</sup>Al və <sup>27</sup>Mg radioizotoplarıdır ki, onların da yarımparçalanma periodları uyğun olaraq 26.9san, 2.2dəq və 9.4dəq kimidir. Cədvəldə qeyd olunan digər aktiv radioizotoplar, neytron tutulması və sonrakı radioaktiv parçalanma ilə induksiya olunan izotopları, məsələn, <sup>51</sup>Cr, <sup>124</sup>Sb, <sup>60</sup>Co, <sup>46</sup>Sc və <sup>181</sup>Ta da daxil olmaqla, digər izotopları əhatə edir. Bu izotopların aktivlik səviyyələri, Bq ilə ölçülən və onların nanohissəcik matrisindəki müvafiq konsentrasiyaları, şüalanmadan sonra nümunənin radioloji xüsusiyyətini anlamağa kömək edir. Bundan əlavə, cədvəldə tutulan neytronlar haqqında məlumatlar da verilmişdir, bu da TiC nanozərrəciklərinin şüalanma prosesi zamanı udduqları neytronların sayını göstərir. Bu məlumatlar, materialın içində neytron selinin paylanması və nanozərrəciklərin neytron şüalanması ilə necə qarşılıqlı əlaqədə olduğunu başa düşmək üçün vacibdir. Son olaraq, cədvəldə TiC nanozərrəciklərində şüalanmadan əvvəl mövcud olan və neytron şüalanması nəticəsində heç bir əhəmiyyətli transformasiyaya uğramamış sabit izotopların konsentrasiyası da təqdim olunur. Bu sabit izotoplar, nanozərrəciklərin fon tərkibini kontekstual şəkildə başa düşməyə kömək edir və materialın ümumi tərkibi və xüsusiyyətlərinə neytron şüalanmasının təsirlərini daha yaxşı anlamağa imkan verir. Bu cədvəl, şüalanmış TiC

nanozərrəciklərinin radioloji təsirini və material tərkibini qiymətləndirmək üçün əsas istinad nöqtəsi rolunu oynayır və yüksək neytron axını olan mühitlərdə onların potensial tətbiqlərini araşdırmağa kömək edir.

#### 4. Nəticələr

Bu tədqiqat, TiC nanohissəciklərinin neytron şüalanmasından sonra radioloji xüsusiyyətlərinin detallı təhlilini təqdim edir. Nəticələr göstərir ki, iz elementləri, materialın radioloji xüsusiyyətinin müəyyən edilməsində mühüm rol oynayır. Yüksək aktivlik səviyyələrinə malik olan <sup>51</sup>Cr və <sup>124</sup>Sb izotopları, aktivliyin azalma profilinin ilkin və orta mərhələlərində əsas təsir edən amillər kimi müəyyən olunmuşdur. Əlavə olaraq, <sup>60</sup>Co, <sup>46</sup>Sc və <sup>181</sup>Ta kimi izotopların aşağı aktivlik səviyyələri müşahidə edilmişdir ki, bu da bu iz elementlərinin radioloji təsirinin minimal olduğunu göstərir. Müəyyən edilmişdir ki, çox kiçik yaşama müddətinə malik <sup>19</sup>O, <sup>28</sup>Al və <sup>27</sup>Mg izotopları konsentrasiyaları ümumilikdə təqribən 0,7%-dir.

Araşdırma, iz elementlərinin konsentrasiyalarını dəqiq ölçülməsinin və xarakterizə olunmasının vacibliyini vurğulayır, çünki hətta aşağı konsentrasiyalar belə materialın radioloji davranışını əhəmiyyətli dərəcədə təsir edə bilər. Bu izotopların uzun müddət, 360 saat ərzində izlənməsi, parçalanma dinamikası və müxtəlif izotopların TiC nanohissəciklərində davamlılığı barədə

dəyərli məlumatlar təmin etmişdir. Bundan əlavə, tədqiqatda neytron selinin nanomateriallarla qarşılıqlı təsiri araşdırılmışdır. Belə ki, neytronların tutulması müxtəlif izotopik parçalanmalara səbəb ola bilər və bu da öz növbəsində materialın xüsusiyyətlərinə və radiasiya intensivliyi olan mühitlərdə potensial təbiiqlərə təsir göstərir.

Ümumilikdə, alınmış nəticələr TiC nanozərrəciklərinin neytronla zəngin mühitlərdə radioloji stabilliyi və təhlükəsizliyi barədə anlayışı artırır və onların nüvə reaktorları, şüalanmadan qoruma materialları və digər yüksək şüalanma mühitlərində istifadə imkanlarını araşdırmaq üçün yeni yollar açır, burada şüalanmış materialların uzunmüddətli davranışını anlamaq çox vacibdir.

- [1] *Yin Wang et al.* "Effect of nano-TiC/TiB<sub>2</sub> and final thermo-mechanical treatment on microstructure and properties of 7185 alloy" *Materials Today Communications* 40, 2024, 109748
- [2] *Qingjian Meng et al.* "Microstructure and performance optimization of laser cladding nano-TiC modified nickel-based alloy coatings" *Surface and Coatings Technology* 479, 2024, 130583
- [3] *Bingxu Wang et al.* "Insights into the microstructure evolution and wear resistance of Nano-TiC particles reinforced High-Cr hot work die steel" *Journal of Materials Research and Technology* 30, 2024, 8371-8381
- [4] *Xin Chen et al.* "Microstructure and electrochemical corrosion behavior of TA<sub>2</sub> with nano/micro TiC particle reinforcement" *Materials Characterization* 212, 2024, 113972
- [5] *P. Balasundar et al.* "Tribo-mechanical performance of Al-nano TiC composites processed by microwave-assisted powder metallurgy" *Ceramics International* 50, 2024, 36448-36457
- [6] *Yu Chen et al.* "γ-Radiation-induced in-situ formation of TiC/MXene nanocomposites for superior electromagnetic wave absorption" *Composites Communications* 50, 2024, 102027
- [7] *H. Kurishita et al.* "Development of recrystallized W-1.1%TiC with enhanced room-temperature ductility and radiation performance" *Journal of Nuclear Materials* 398, 2010, 87-92
- [8] *M. Jiang et al.* "A comparative study of low energy radiation responses of SiC, TiC and ZrC" *Acta Materialia* 110, 2016, 192-199
- [9] *M. Jiang et al.* "The role of Ti and TiC nanoprecipitates in radiation resistant austenitic steel: A nanoscale study" *Acta Materialia* 197, 2020, 184-197
- [10] *Elchin M. Huseynov, Raisa R. Hakhiyeva, Nizami M. Mehdiyev.* "FTIR study of nanocrystalline titanium carbide (TiC) particles exposed to gamma radiation" *Solid State Communications* 378, 2024, 115417
- [11] *Raisa R. Hakhiyeva, Afsun S. Abiyev, Elchin M. Huseynov.* "Comprehensive analysis of gamma irradiation-induced crystallographic transformations in TiC nanoparticles using X-ray diffraction techniques" *Radiation Physics and Chemistry* 227, 2025, 112363
- [12] *Elchin M. Huseynov & Raisa R. Hakhiyeva.* "Investigation of gamma irradiated nanocrystalline titanium carbide particles using thermal methods" *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* volume 332, 2023, 3779-3785
- [13] *Haimin Ding et al.* "Atomic insight on the electronic structure and interfacial bonding characterization of the Cu/TiC interface" *Ceramics International* 50, 2024, 46791-46801
- [14] *Peiman Amiri et al.* "Ab-initio study of electronic and phononic properties of bulk TiC and its narrow nanowires by density functional theory" *Physica B: Condensed Matter* 578, 2020, 411761
- [15] *Puspa Raj Adhikari et al.* "Diameter Dependent Structural and Electronic Properties of TiC Nanotubes" *Materials Today: Proceedings* 47, 2021, 6536-6544
- [16] *Sun Congli et al.* "Synthesis of porous silicon nano-wires and the emission of red luminescence" *Applied Surface Science*, 282, 2013, 259-263
- [17] *Elchin Huseynov, Anze Jazbec.* "Trace elements study of high purity nanocrystalline silicon carbide (3C-SiC) using *k<sub>0</sub>*-INAA method" *Physica B: Condensed Matter* 517, 2017, 30-34
- [18] *Junjie Niu et al.* "Tiny silicon nano-wires synthesis on silicon wafers" *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 24, 3-4, 2004, 328-332
- [19] *Elchin Huseynov, et al.* "Study of blend composition of nano silica under the influence of neutron flux" *Nano Convergence* 2014 1:21
- [20] *Elchin M. Huseynov, Anze Jazbec.* "Application of neutron transmutation technology to control the physical properties of nanoparticles at the atomic scale" *Carbon* 229, 2024, 119568
- [21] *Elchin M. Huseynov.* "FTIR spectroscopy of ZrC nanoparticles under the gamma radiation" *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy* 286, 2023, 122032
- [22] *Elchin Huseynov, Anze Jazbec, Luka Snoj.* "Temperature vs. impedance dependencies of neutron-irradiated nanocrystalline silicon carbide (3C-SiC)" *Applied Physics A* 125, 2019, 91-98
- [23] *Elchin M. Huseynov, Jale G. Atakishiyeva.* "Characterizing neutron irradiation-induced effects in the nanocrystalline B4C particles using EPR spectroscopy" *Solid State Sciences* 154, 2024, 107604
- [24] *Vladimir Radulović, Žiga Štancar, Luka Snoj, Andrej Trkov,* "Validation of absolute axial neutron flux distribution calculations with MCNP with 197Au(n,γ)198Au reaction rate distribution

**RAÍSƏ R. HAXIYEVA**

- measurements at the JSI TRIGA Mark II reactor”, [26] *Hans Mommsen*. "The importance of a reliable grouping – Neutron activation analysis (NAA) data of Mycenaean pottery sherds re-evaluated with the Bonn filter method" University, Germany, *Journal of Archaeological Science* 39, 3, 2012, 704–707
- [25] *Gasper Zerovnik, Manca Podvratnik, Luka Snoj*, “On normalization of fluxes and reaction rates in MCNP criticality calculations”, *Ann. Nucl. Energy* 63, 2014, 126–128

**Raisa R. Hakhiyeva**

**STUDY OF ELEMENTAL IMPURITIES IN HIGH-PURITY NANOCRYSTALLINE TITANIUM CARBIDE (TiC) USING THE  $k_0$ -INAA METHOD**

Titanium carbide (TiC) nanoparticles were irradiated with a neutron flux ( $2 \times 10^{13}$  n/cm<sup>2</sup>s) from a TRIGA Mark II research reactor. After neutron irradiation, the radioisotopes of trace elements in nanocrystalline TiC were studied as a function of time. The identification of isotopes that significantly increased the activity of the samples as a result of neutron irradiation was performed. Nanocrystalline TiC was synthesized using standard laser techniques, and the purity of the samples was determined using the  $k_0$ -based Neutron Activation Analysis ( $k_0$ -INAA) method. The concentration of trace elements in TiC nanoparticles was determined through the radionuclides of the corresponding elements. The concentration of trace element isotopes was calculated as a percentage according to the  $k_0$ -INAA method.

**Райса Р. Хакхыева**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ПРИМЕСЕЙ В ВЫСОКОЧИСТОМ НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОМ ТИТАНОВОМ КАРБИДЕ (TiC) С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА  $k_0$ -INAA**

Наночастицы титана карбида (TiC) были облучены нейтронным потоком ( $2 \times 10^{13}$  n/cm<sup>2</sup>s) в исследовательском реакторе типа TRIGA Mark II. После нейтронного облучения радиоизотопы следовых элементов в нанокристаллическом TiC были исследованы как функция времени. Была проведена идентификация изотопов, которые значительно увеличивали активность образцов в результате нейтронного облучения. Нанокристаллический TiC был синтезирован с использованием стандартной лазерной техники, а чистота образцов была определена с помощью метода нейтронно-активационного анализа на основе  $k_0$  ( $k_0$ -INAA). Концентрация следовых элементов в наночастицах TiC была определена через радионуклиды соответствующих элементов. Концентрация изотопов следовых элементов была рассчитана в процентах в соответствии с методом  $k_0$ -INAA.

*Qəbul olunma tarixi: 27.11.2024*