

HIZLI ÜRETKEN REAKTÖRLERDE KAZA SONRASI PLUTONYUM AKTİVİTESİ VE KAÇAĞI

Mehmet KIRBIYIK*

Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi
Makina Mühendisliği Bölümü
Bursa

ÖZET

Bu çalışmada; sıvı metal (sodyum) ile soğutulan hızlı üretken reaktörlerin varsayımlı kalp bozulma kaza sonrası, iç ve dış reaktör kapları atmosferindeki radyoaktif plutonyum izotoplarının aktivitesi ve dış kaptan çevreye sızan plutonyum izotopları miktarlarının zamanla değişimi, analitik bir yöntemle hesaplanmıştır. Hesaplamalar 400 MW güçlü Hızlı Test Reaktör yakıtının % 7 buharlaşması ile sonuçlanan kaza durumu için yapılmıştır.

Kaza sonrası, her iki kap içindeki plutonyumun radyoaktiflik konsantrasyonunun havadaki maksimum müsaade edilebilir plutonyum konsantrasyonundan 10^{13} - 10^{14} defa daha büyük olduğu bulunmuştur. Plutonyum izotoplarının toplam kaçak miktarının zamanla hemen hemen lineer olarak artmakta olduğu görülmüştür. Çevreye sızan toplam plutonyum miktarı ise $1,5 \times 10^2$ saniye sonunda ~ 22 Ci ve 3×10^3 saniye sonunda ~ 430 Ci'dir.

ABSTRACT

In the present study, radioactive plutonium isotope activities in inner and outer containment atmospheres and time dependence of the change in the amount of plutonium isotopes released to the environment from the outer containment were calculated using an analytical method following the hypothetical core-disruptive accident in liquid metal (sodium) cooled fast breeder reactors. Calculations were made for 400 MW Fast Test Reactor whose fuel 7 % vaporized in the accident.

It was found that the radioactive plutonium concentration in each containment atmosphere was 10^{13} - 10^{14} times greater than the maximum permissible plutonium concentration in air, following the accident. The results show that the total leakage of the plutonium isotopes approximately increases as a linear function of time. The total amount of plutonium released to the environment is approximately 22 Ci for $1,5 \times 10^2$ second and 430 Ci for 3×10^3 second.

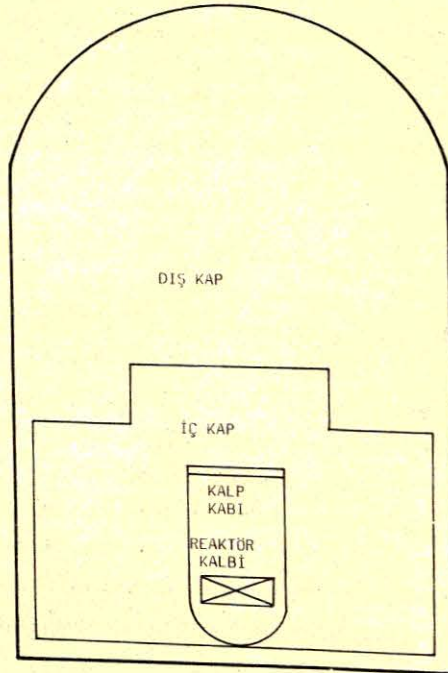
* Doç. Dr.

1. GİRİŞ

İçinde bulunduğumuz çağda amacımız, çevre ve insan sağlığına zararsız enerji kaynaklarından yararlanabilme teknolojisini geliştirmektedir. Geleceğin hızlı üretken reaktörlerinin çok miktarda plutonyum üretmesi, çevre sağlığı açısından önemli sorunlar yaratacaktır. Plutonyumun silah yapımında kullanılması karşımıza uluslararası bir sorun olarak çıkmaktadır. Reaktör emniyeti açısından en önemli sorun ise büyük bir kalp bozulma kazasının meydana gelmesi halinde radyoaktif plutonyum dioksit aerosol taneciklerinin çevreye sızmasıdır. Çünkü plutonyum biyolojik olarak çok zehirli bir elementtir. Hava ve içilebilir sudaki maksimum müsaade edilebilir plutonyum konsantrasyonu sırası ile $2 \times 10^{-12} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$ ve $1,5 \times 10^{-6} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$ 'tür¹. Bu konsantrasyonlar diğer herhangi bir radyoaktif element için müsaade edilen konsantrasyondan daha küçüktürler. Bunun için hızlı üretken reaktörlerin kaza analizi yapılırken plutonyum kaynağının sağlıklı olarak hesaplanması gerekmektedir.

Sodyum ile soğutulan hızlı üretken reaktörlerin varsayımlı kalp bozulma kazalarında yakıtın buharlaşması ve yoğunlaşmasını hesaplamak için birçok çalışma yapılmıştır^{2,3,4}. Kazanın çok hızlı gelişmesi halinde soğutucu sodyum ve yapı malzemelerine ısı transferi imkanı olmayacağından kalpte maksimum yakıt buharlaşması meydana gelir. Bu yakıt buharı, büyüklüğü mikron mertebesinde olan aerosol taneciklerinin asıl kaynağını teşkil etmektedir. Çünkü aerosol tanecikleri yakıt buharının yoğunlaşmasından meydana gelmektedir. Yapılan deneysel ve analitik çalışmalar, yoğunlaşan yakıt taneciklerinin $1 \mu\text{m}$ 'den daha küçük olduğunu göstermektedir^{5,6}. İnsan sağlığına zararlı plutonyumu da ihtiva eden bu çok küçük aerosol tanecikleri çeşitli yollardan çevreye kolayca sızabilmektedir.

Bu çalışmanın amacı; bir hızlı üretken reaktöründe varsayımlı kalp bozulma kazasının meydana gelmesi halinde, buharlaşan yakıtın iç ve dış kapta yoğunlaşmasından dolayı meydana gelen aerosol taneciklerinin iç ve dış kap atmosferindeki davranışlarını incelemek, çevreye sızan plutonyum kaçacağını ve kaplar atmosferindeki plutonyum aktivitesini zamana bağlı olarak hesaplamaktır. Şekil 1'de bir hızlı üretken reaktörün basitleştirilmiş şeması görülmektedir.



Şekil 1 – Bir Hızlı Üretken Reaktörün Basitleştirilmiş Şeması

2. ANALİTİK YÖNTEM

Genel olarak aerosol taneciklerinin dağılımı log-normal dağılıma uymaktadır. Deneysel çalışma sonuçlarına göre UO_2 ve PuO_2 buharının yoğunlaşması ile meydana gelen aerosol taneciklerinin büyüklük dağılımı da bir log-normal dağılım göstermekte ve dağılım fonksiyonu, r tanecik yarıçapı olmak üzere,

$$n(r) = \frac{N_0}{\sqrt{2\pi} \ln \sigma} \left[\exp - \left(\frac{\ln \frac{r}{r_{g0}}}{\sqrt{2} \ln \sigma} \right)^2 \right] \frac{1}{r} \quad (1)$$

bağıntısı ile verilmektedir^{7,8}. Burada $n(r)$ öyle tarif edilir ki $n(r) dr$ çarpımı, yarıçapları r ile $r + dr$ arasında bulunan aerosol taneciklerinin birim hacimdeki sayısını verir.

$$N_0 = \int_0^{\infty} n(r) dr \quad (2)$$

Birim hacimdeki toplam tanecik sayısıdır. Bu log-normal dağılım fonksiyonundaki r_{g0} geometrik ortalama yarıçap, σ geometrik standart sapmadır. Birim hacimdeki aerosol taneciklerinin toplam hacmi ise

$$\phi = \frac{4\pi}{3} \int_0^{\infty} r^3 n(r) dr \quad (3)$$

olur. Bu (3) denkleminde (1) denklemi yerine konur ve integrali alınırsa,

$$\phi = \frac{4\pi}{3} r_{g0}^3 N_0 \exp (4,5 \ln^2 \sigma) \quad (4)$$

bulunur.

Reaktör kalbinin kabından iç ve dış kaba sızan yakıt buharının miktarı ve kap hacimleri bilinirse buharın tamamen yoğunlaşması ile meydana gelen yakıt aerosolunun C_0 kütle konsantrasyonu hesaplanabilir.

Aerosol taneciklerinin ρ yoğunluğu ile birim hacimdeki bu taneciklerin toplam hacmi arasında

$$C_0 = \rho \phi \quad (5)$$

bağıntısı kolayca yazılabilir. Bu bağıntıda (4) denklemi yerine konursa

$$C_0 = \frac{4\pi}{3} r_{g0}^3 N_0 \rho \exp (4,5 \ln^2 \sigma) \quad (6)$$

ifadesi elde edilir.

Reaktör kabı içinde yakıt buharının yoğunlaşması ile meydana gelen aerosol tanecikleri ısıl hareketlerinden dolayı birbiri ile çarpışırlar. Çarpışan bu aerosol tanecikleri daha büyük aerosol taneciklerini meydana getirirler. Bu pıhtılaşma işlemi süresince aerosol taneciklerinin büyüklükleri artarken birim hacimdeki toplam tanecik sayısı da azalır. Aynı büyüklükteki taneciklerin birim hacimdaki toplam sayısının zamanla değişimi

$$\frac{dN}{dt} = -KN^2 \quad (7)$$

denklemleri ile verilmektedir⁹. Burada K pıhtılaşma sabitidir. Bu sabit zaman ve tanecik büyüklüğünden hemen hemen bağımsız olup değeri $6 \times 10^{-10} \text{ cm}^3/\text{s}'dir^8$.

Reaktör kabı içinde homojen olarak dağılmış taneciklerin pıhtılaşma işlemi süresince büyük taneciklerin reaktör kabının tabanına çökmesinden dolayı tanecik sayısı ve kütle konsantrasyonları azalmaya başlar. Çökme hızı Stokes Kanunu kullanılarak hesaplanabilir¹⁰. Aynı büyüklükteki aerosol taneciklerinin sayı ve kütle konsantrasyonlarının zamanla azalma hızları

$$\frac{dN}{dt} = - \frac{v}{h} N \quad (8)$$

ve

$$\frac{dC}{dt} = - \frac{v}{h} C \quad (9)$$

denklemlerine göre değişmektedir. Burada h reaktör kabının etkin yüksekliğini, v ise limit hızı göstermektedir. Limit hız

$$v = \frac{2}{9} \frac{\rho g}{\mu} r_g^2 F(r_g) \quad (10)$$

ifadesi ile verilmektedir. Bu ifadedeki $F(r_g)$ Stokes-Cunningham düzeltme çarpanı, μ aerosol taneciklerinin asılı kaldığı kap içindeki ortamın viskozitesi, g yerçekimi ivmesi ve r_g ise o andaki aerosol taneciklerinin geometrik ortalama yarıçapıdır. Düzeltme çarpanı $F(r_g)$, aerosol taneciklerinin geometrik ortalama yarıçapına bağlı olarak

$$F(r_g) = 1 + \frac{8,3 \times 10^{-6}}{r_g} + \frac{2,65 \times 10^{-6}}{r_g} e^{-16,66 \times 10^4 r_g} \quad (11)$$

bağıntısı ile verilir¹⁰. Burada r_g 'nin birimi $\mu\text{m}'dir$.

Büyük aerosol tanecikleri çökelirken küçük tanecikler de reaktör kabının içindeki düşey yüzeyler üzerine yayılır. Yayınım olayı yüzeylerin yakınındaki kararlı atmosfer tabakasında meydana gelmektedir. Yayınım ile düşey yüzeyler üzerinde birikimden dolayı aerosol taneciklerinin sayı ve kütle konsantrasyonlarındaki değişme hızı

$$\frac{dN}{dt} = - \frac{SD}{V\delta} N, \quad (12)$$

$$\frac{dC}{dt} = - \frac{SD}{V\delta} C \quad (13)$$

olur¹⁰. Burada S reaktör kabı içindeki düşey yüzeylerin toplam alanı, D yayınım sabiti, V reaktör kabının serbest toplam hacmi ve δ yüzeyler yakınındaki kararlı tabaka kalınlığıdır. Pıhtılaşma sabiti K ile yayınım sabiti D arasında aşağıdaki bağıntı vardır¹¹.

$$K = 8\pi r_g D \quad (14)$$

Bu bağıntıdan, K ve r_g bilindiğinde D hesaplanabilir. Kararlı tabaka kalınlığı δ ise $20 \mu\text{m}$ civarındadır¹⁰.

Bir nükleer reaktörün dizaynı yapılırken reaktör dış kabının çevreye hiçbir radyoaktif madde sızdır-
maması istenir. Reaktör kazası olması halinde mutlaka bir radyoaktif madde kaçığı mevcuttur. Onun için
reaktör dizaynı yapılırken basınca bağlı olarak bir dizayn kaçak hızı verilir. Bu kaçak hızı da günde reaktör
kabı hacminin belirli bir yüzde ile çarpımı büyüklüğündedir. Kaçak hızı sabiti τ olduğuna göre çevreye rad-
yoaktif maddenin sızmasından dolayı tanecik sayısı ve kütle konsantrasyonlarındaki değişme hızları için

$$\frac{dN}{dt} = - \frac{\tau V}{V} N , \quad (15)$$

$$\frac{dC}{dt} = - \frac{\tau V}{V} C \quad (16)$$

yazılabilir.

2.1. Reaktör Kapları Atmosferindeki Plutonyum Aktivitesi

Hızlı üretken reaktörlerin emniyet analizinde yakıt aerosol taneciklerinin davranışlarının incelen-
mesindeki amaç, bu radyoaktif taneciklerinin aktivitesini hesaplamaktır. Özellikle plutonyumun insan sağlı-
ğı için çok zararlı olması bu konuya önem kazandırır. Kaza sonrası, reaktör kaplarının atmosferindeki za-
mana bağlı plutonyum aktivitesinin bilinmesi reaktörün emniyet analizi için gereklidir.

Herhangi bir t anında reaktör kapları içindeki yakıt aerosol taneciklerinin sayı ve kütle konsantras-
yonlarındaki değişme hızları için

$$\frac{dN}{dt} = - KN^2 - \left[\frac{v(r_g)}{h} + \frac{SD(r_g)}{V\delta} + \tau \right] N , \quad (17)$$

$$\frac{dC}{dt} = - \left[\frac{v(r_g)}{h} + \frac{SD(r_g)}{V\delta} + \tau \right] C \quad (18)$$

denklemleri yazılabilir. Bu diferensiyel denklemlerin aynı andaki çözümleri reaktör kapları atmosferindeki
tanecik sayısı ve kütle konsantrasyonları N, C 'nin zamana bağlı olarak değişimini verir. Limit hız ve yayılım
sabit D , geometrik ortalama yarıçap r_g 'nin fonksiyonudur. Geometrik ortalama yarıçap da zamanla değiş-
mektedir. Dolayısıyla (17) ve (18) denklemlerini çözebilmek için bu denklemlere ilave olarak (6) denkleminin
herhangi bir t anındaki ifadesini kullanabiliriz. Bu durumda (6) denkleminde C_0 yerine C , r_{g0} yerine r_g
ve N_0 yerine N alınması gerekmektedir. Hesaplamalarda geometrik ortalama yarıçap r_g zamanla artarken
geometrik standart sapma σ 'nın ve yoğunluk ρ 'nun tanecik büyüklüğü ile değişmediğini kabul edeceğiz.

Geometrik ortalama yarıçapın fonksiyonu olan limit hız ve yayılım sabiti, sonlu küçük bir Δt za-
man aralığında yaklaşık olarak sabit alındığı takdirde (17) ve (18) denklemlerinin çözümü kolayca bulunur.

Dikkat edilirse (17) denkleminin Bernoulli tipi, (18) denkleminin de değişkenlerine ayrılabilen bir dife-
rensiyel denklemdir. Bu denklemlerin (t^n, t^{n+1}) zaman aralığındaki çözümleri

$$N^{n+1} = \frac{\left[\frac{v(r_g^n)}{h} + \frac{SD(r_g^n)}{V\delta} + \tau \right] N^n}{\left[\frac{v(r_g^n)}{h} + \frac{SD(r_g^n)}{V\delta} + \tau + KN^n \right] \exp \left\{ \left[\frac{v(r_g^n)}{h} + \frac{SD(r_g^n)}{V\delta} + \tau \right] [t^{n+1} - t^n] \right\} - KN^n} \quad (19)$$

$$\left[\frac{v(r_g^n)}{h} + \frac{SD(r_g^n)}{V\delta} + \tau + KN^n \right] \exp \left\{ \left[\frac{v(r_g^n)}{h} + \frac{SD(r_g^n)}{V\delta} + \tau \right] [t^{n+1} - t^n] \right\} - KN^n$$

$$C^{n+1} = C^n \exp\left\{-\left[\frac{v(r_g^n)}{h} + \frac{SD(r_g^n)}{V\delta} + \tau\right][t^{n+1} - t^n]\right\} \quad (20)$$

olur. t^{n+1} anındaki N^{n+1} sayı ve C^{n+1} kütle konsantrasyonları bilindiğine göre (6) denkleminde o andaki geometrik ortalama yarıçap

$$r_g^{n+1} = \left\{C^{n+1} / \left[\frac{4\pi}{3} N^{n+1} \rho \exp(4,5 \ln^2 \sigma)\right]\right\}^{1/3} \quad (21)$$

olarak bulunur.

Dikkat edilirse herhangi bir t anındaki değerler bilindiğinde sonlu çok küçük bir Δt zaman sonra $t + \Delta t$ anındaki radyoaktif yakıt aerosol taneciklerinin sayı ve kütle konsantrasyonları, geometrik ortalama yarıçapı hesaplanabilir.

Bu çalışmanın amacı radyoaktif plutonyum kaçağını ve aktivitesini hesaplamak olduğuna göre herhangi bir t anındaki plutonyum kütle konsantrasyonunun bilinmesi gerekmektedir. Plutonyum da kararlı halde çalışan hızlı bir üretken reaktörde belirli oranlarda ^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Pu , ^{242}Pu radyoaktif izotoplarından oluşmaktadır. Reaktör kabı içinde plutonyum elementinin i izotopunun P_i kütle konsantrasyonunun zamanla değişimini veren ifade

$$\frac{dP_i}{dt} = - \left[\frac{v(r_g)}{h} + \frac{SD(r_g)}{V\delta} + \tau + \lambda_i \right] P_i \quad (22)$$

olur. Burada λ_i plutonyumun i izotopunun bozunma sabitidir. Sonlu küçük bir Δt zaman aralığında yakıt aerosol taneciklerinin yayılım sabiti ve limit hızı sabit kabul edilerek (22) denklemi değişkenlerine ayrıldığında integrali alınırsa

$$P_i^{n+1} = P_i^n \exp\left\{-\left[\frac{v(r_g^n)}{h} + \frac{SD(r_g^n)}{V\delta} + \tau + \lambda_i\right][t^{n+1} - t^n]\right\} \quad (23)$$

bulunur. Görüldüğü gibi bir evvelki plutonyum konsantrasyonu bilinirse bir sonraki konsantrasyon hesaplanabilir. Sodyum ile soğutulan hızlı üretken reaktörlerin yakıtının yaklaşık olarak % 20'si plutonyum dioksit olduğuna göre $t = 0$ anında reaktör kabı atmosferindeki i izotopunun kütle konsantrasyonu

$$P_{i0} = 0,20 \epsilon_i \frac{W_i}{W_i + \omega} C_0 \quad (24)$$

olur. Burada ϵ_i i izotopunun ağırlık yüzdesi, W_i atom ağırlığı ve ω oksijenin molekül ağırlığıdır. W_i ve ω 'nın birimi g/gmol'dur.

i izotopunun t anında birim hacimdeki atom sayısının $P_i A_0 / W_i$ ve saniyedeki $3,70 \times 10^{10}$ bozunmanın 1 curie olduğu anımsanırsa aynı izotopun aktivitesi

$$A_i = \frac{A_0 \lambda_i P_i}{3,70 \times 10^{10} W_i} \quad (25)$$

olur. Burada A_0 Avogadro sayısı $6,023 \times 10^{23}$ atom/gmol, λ_i bozunma sabiti s^{-1} , P_i kütle konsantrasyonu da g/cm^3 alındığında; $A_i Ci/cm^3$ cinsinden bulunur. Reaktör kabı atmosferindeki plutonyum izotoplarının toplam aktivitesi ise

$$A_{top} = \sum_i A_i \quad (26)$$

olur.

Reaktör emniyeti açısından yakıt buharının ve diğer radyoaktif malzemenin iç kaptan dış kaba geçmemesi istenir. Fakat ağır kaza koşulları gözönünde bulundurulursa önce iç kapta, sonra iç kap ve dış kap birleştirilerek kaza analizi yapılmalıdır. Yakıt buharının dış kaba sızmadığı düşünülürse yukarıdaki denklemlerde kaçak hızı sabiti τ sıfır alınarak iç kap atmosferindeki aerosol taneciklerinin zamana bağlı sayısı ve kütle konsantrasyonları, geometrik ortalama yarıçap, plutonyum aktivitesi hesaplanabilir. İç kap ve dış kap birleştirilip bir kapalı sistem olarak gözönüne alındığında yukarıdaki denklemler bu kapalı sistem için de geçerlidir.

2.2. Plutonyum Kaçağı

Bir reaktör kazasından sonra reaktör binasına belirli uzaklıklardaki radyoaktivite konsantrasyonunu hesaplayabilmek için zamana bağlı dış kaptan çevreye sızan radyoaktif kaynağın bilinmesi gerekmektedir. Hızlı üretken reaktörlerin kaza analizi yapılırken çevreye sızan plutonyum miktarının sağlıklı olarak hesaplanması, emniyet analizi raporlarının gerçeği yansıtması bakımından önemlidir.

Herhangi bir t anında reaktör kapları atmosferindeki plutonyumun i izotopunun aktivitesi A_i , kaçak hızı sabiti τ ve reaktör kaplarının toplam hacmi de V olduğuna göre çeşitli yollarla çevreye sızan i izotopunun kaçak hızı

$$Q_i = V\tau A_i \quad (27)$$

olur. Burada V 'nin birimi cm^3 ve Q_i 'nin birimi Ci/s 'dir. Aynı andaki toplam plutonyum kaçak hızı da

$$Q_{top} = \sum_i Q_i \quad (28)$$

ifadesi ile verilir.

Kazanın başlaması ile hesaplama sonuna kadar geçen zaman içinde reaktör kaplarını terkeden plutonyum miktarı ise

$$L = \sum_n Q_{top} \Delta t^n \quad (29)$$

olur. Burada $\Delta t^n = t^{n+1} - t^n$ 'dir.

Buraya kadar anlatılan bağıntılar ve çıkarılan denklemler; büyüklüğü mikron mertebesinde, log-normal dağılım gösteren aerosol tanecikleri için geçerlidir. Zamanla tanecikler belirli büyüklüğe ulaşır ve tanecik sayısı konsantrasyonu azalır. Artık pıhtılaşma ve yayılım işlemi ihmal edilebilir ve kapalı sistem atmosferindeki asılı tanecikler log-normal dağılım göstermezler. Kısım 2.1'de (21) denklemindeki $\exp(4,5 \ln^2 \sigma)$ çarpanı da bire yaklaşır. Bu noktadan sonra reaktör kapları içindeki asılı taneciklerin yalnız çökmesi ve kaçması önemlidir. Kısım (2.1)'deki denklemlerde pıhtılaşma sabiti K ve yayılım sabiti D sıfır alınarak reaktör kapları atmosferindeki zamana bağlı plutonyum aktivitesi ve plutonyum kaçağı hesaplanabilir.

3. ÖRNEK HESAPLAMA

Hızlı üretken reaktörlerin kalp bozulma kaza sonrası, reaktör kapları atmosferindeki plutonyum aktivitesini ve kaçacağını hesaplamak için anlatılan analitik yöntem FTR*ye uygulanmıştır. Bu uygulamada hesaplamaları yapmak için FORTRAN IV dilinde yazılmış AYDA 1 programı kullanılmıştır.

Bilindiği gibi FTR, 400 MW (t) gücünde hızlı nötronlarla çalışan ve sodyum ile soğutulan bir test reaktörüdür^{1,2}. Yakıtı uranyum dioksit ve plutonyum dioksit karışımından oluşmaktadır. Toplam yakıt miktarı $3,4440 \times 10^6$ g, iç ve dış kabının serbest hacimleri, $1,8123 \times 10^9$ cm³ ve $4,2476 \times 10^{10}$ cm³ tür. FTR'de varsayılan kalp bozulma kazasında yakıtın % 7 si buharlaşmaktadır². Bu $2,4108 \times 10^5$ g yakıt buharının reaktör kalbinin kabından önce iç, sonra dış kaba sızarak yayıldığı ve aniden yoğunlaştığı kabul edilmektedir.

Reaktör emniyeti açısından kaza sonrası yakıt buharının dış kaba sızması arzu edilir. Fakat ağır kaza koşullarında, bu durum garanti edilemez. O bakımdan hesaplamalar; önce yakıt buharının yalnız iç kaba, sonra iç ve dış kap birleştirilerek elde edilen eş değer dış kaba sızması hali için yapılmıştır. Bu silindirik kapların h yüksekliği bilindiğinde hesaplamalar için gerekli yanal yüzeylerin S alanı $2(\pi hV)^{1/2}$ ifadesinden kolayca hesaplanabilir.

Hızlı üretken reaktörlerde iç kaba sodyum sızması halinde, sodyumun hava ile temasını önlemek için kabin serbest hacmi azot gazı ile doludur. Dış kap içinde ise hava vardır. Bu duruma göre eşdeğer dış kap içindeki yakıt aerosol taneciklerinin ortamı hava olarak alınabilir.

Bir hızlı reaktör kazasında yakıt, fisyon ürünleri ve soğutucudan oluşan aşırı doymuş buharın yoğunlaşması ile meydana gelen aerosol taneciklerinin çapı Fuchs ve Sutugin'e^{1,3} göre 0,002 ve 0,02 µm, Reist'e^{1,4} göre 0,01 ve 0,1 µm arasında değişmektedir. Uranyum dioksit ve plutonyum dioksit aerosolları üzerinde yapılan çalışma sonuçlarına da dayanarak emniyetli bir hesaplama için ilk geometrik ortalama yarıçap r_{g0} değeri 0,005 µm, yarıçaplar üzerindeki geometrik standart sapma σ değeri ise 1,5 alınmıştır. Hesaplama süresince yakıt aerosol taneciklerinin yoğunluğu ρ için 6 g/cm³ kullanılmıştır⁷.

Plutonyum kaçığını hesaplamak için gerekli kaçak hızı sabiti τ ise % 1/gün olarak alınmıştır.

Sodyum ile soğutulan ve kararlı halde çalışan hızlı bir üretken reaktörde mevcut plutonyum izotoplarının ağırlık yüzdeleri Tablo 1'de verilmektedir^{1,5}. Tabloda ayrıca atom ağırlıkları, yarı-ömür ve bozunma sabitleri de yer almaktadır.

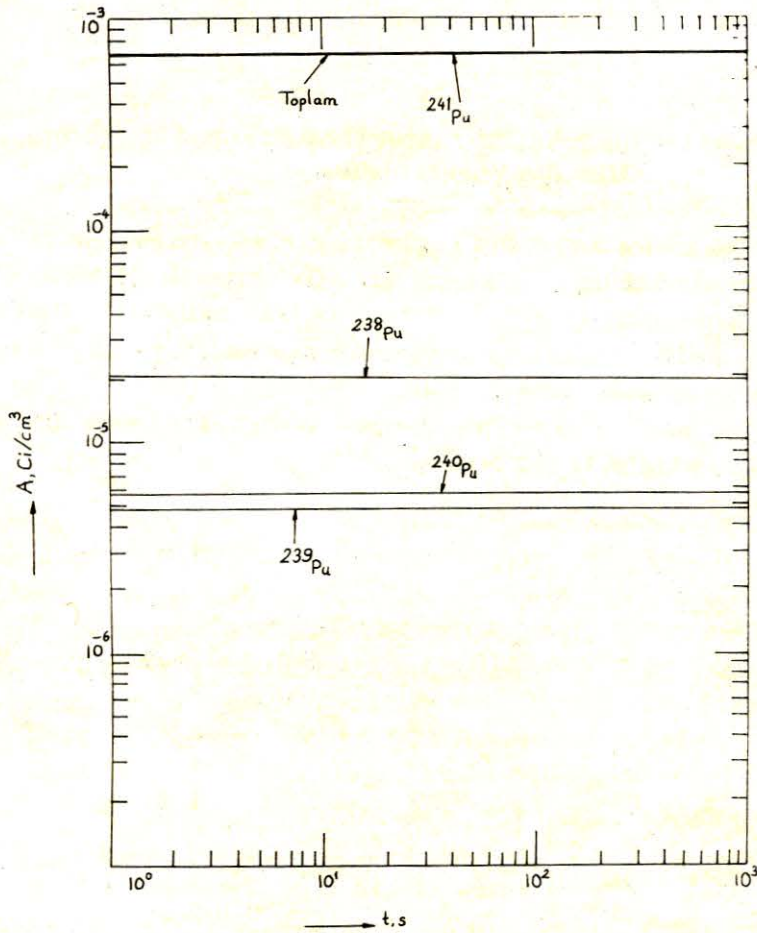
Tablo 1 — Plutonyum İzotoplarının Özellikleri

İzotop	Atom Ağırlığı W	Yarı-Ömür $T_{1/2}$ yıl	Bozunma Sabiti λ, s^{-1}	Ağırlık Yüzdesi
$^{238}_{Pu}$	238,0495	86,4	$2,5434 \times 10^{-10}$	1
$^{239}_{Pu}$	239,0521	24400	$9,0061 \times 10^{-13}$	69
$^{240}_{Pu}$	240,0539	6580	$3,3397 \times 10^{-12}$	22
$^{241}_{Pu}$	241,0567	13,2	$1,6648 \times 10^{-9}$	5
$^{242}_{Pu}$	242,0587	$3,79 \times 10^5$	$5,7981 \times 10^{-14}$	3

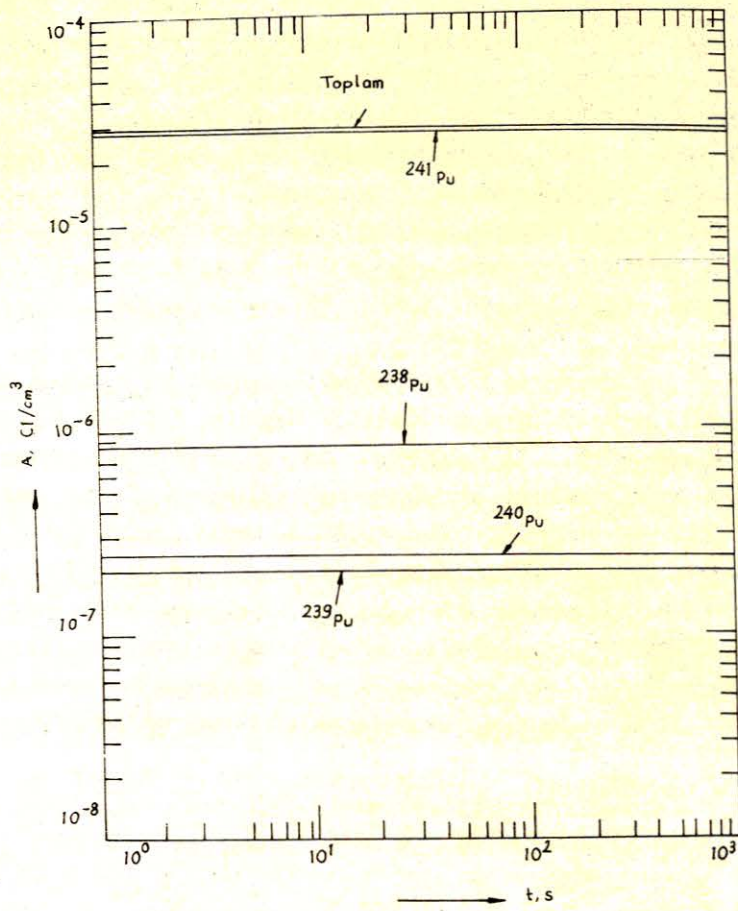
* Fast Test Reactor

Nümerik denemeler sonunda yakıt aerosol taneciklerinin sayısı ve kütle konsantrasyonlarının hesaplamalarında sonlu küçük Δt zaman aralığı için en uygun değer 0,5 saniye bulunmuştur. Yakıt aerosolunun oluştuğu anda iç kap ve eşdeğer dış kabın birim hacmindeki toplam tanecik sayısı yüksek olduğundan pıhtılaşma çok hızlıdır. Dolayısıyla 0 ile 0,5 saniye arasındaki tanecik sayısı konsantrasyonunun değişiminin gözlenmesi istendiği takdirde daha küçük zaman adımı alınmasının gerekeceği unutulmamalıdır. Fakat kütle konsantrasyonları ve aktivite hesaplamalarında daha küçük zaman adımının alınmasına gerek yoktur. Çünkü yakıt kütle konsantrasyonu ve plutonyum izotoplarının aktivitesi zamanla çok yavaş olarak değiştiği hesaplanmıştır. Tüm hesaplamalar, iç kabın yüksekliği $1,501 \times 10^3$ cm ve eşdeğer dış kabın yüksekliği $3,524 \times 10^3$ cm alınarak yapılmıştır.

İç ve eşdeğer dış kap atmosferindeki radyoaktif plutonyum izotoplarının aktivitesinin zamana göre değişimi sıra ile Şekil 2 ve Şekil 3'te gösterilmektedir. Başlangıç değerleri (24) bağıntısından yararlanarak hesaplanan kütle konsantrasyonlarının hesaplama zamanı içinde çok yavaş azalması ve Tablo 1'de görüldüğü gibi bozunma sabitlerinin çok küçük olmasından dolayı plutonyum izotoplarının radyoaktiflik konsantrasyonu zamanla çok yavaş değişmektedir. Plutonyum-242 izotopunun aktivitesi diğer izotoplara göre çok küçüktür. $t = 0$ anında radyoaktiflik konsantrasyonu iç kap içinde $1,4 \times 10^{-8}$ Ci/cm³, eşdeğer dış kap içinde $5,6 \times 10^{-10}$ Ci/cm³ gibi nisbeten küçük değerler olduğundan her iki Şekilde de gözükmemektedir. Dikkat edilirse hesaplama süresince elde edilen radyoaktiflik konsantrasyonu değerleri havadaki maksimum müsaade edilebilir 2×10^{-18} Ci/cm³ değerinden çok büyüktürler. Bu durum; hızlı üretken reaktörlerde böyle büyük bir kazanın olması halinde, reaktör binası içine uzun müddet girilmemesi gerektiğini göstermektedir.



Şekil 2 — İç Kap Atmosferindeki Plutonyum İzotoplarının Aktivitesinin Zamanla Değişimi



Şekil 3 – Eşdeğer Dış Kap Atmosferindeki Plutonyum İzotoplarının Aktivitesinin Zamanla Değişimi

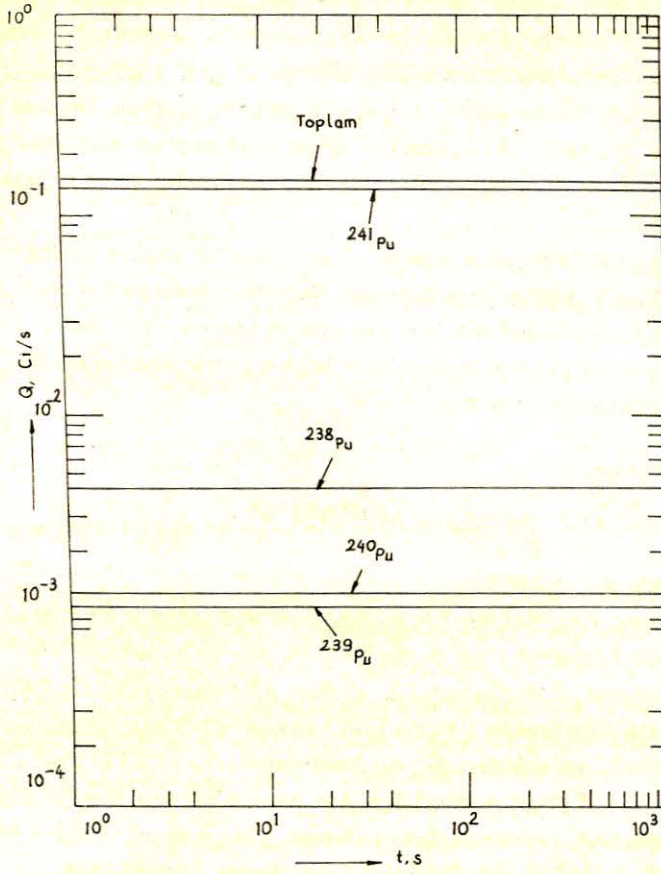
Şekil 4'te plutonyum izotoplarının eşdeğer dış kaptan kaçma hızlarının zamana göre değişimi verilmektedir. Plutonyum-242 izotopunun kaçak hızı, diğerleri yanında çok küçük olduğundan şekilde gözükmemektedir. Başlangıçtaki değeri $2,9 \times 10^{-6}$ Ci/s 'dir. Hesaplama süresince kaçak hızlarında dikkate değer bir değişim olmadığı halde zamanla azalması beklenmektedir. Bu azalmayı görebilmek için hesaplanmanın uzun zaman devam etmesi gerekeceği açıktır.

Kaza sonrası, belirli bir zaman süresince reaktör dış kabından çevreye sızan plutonyum izotoplarının curie cinsinden miktarları Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2 – Plutonyum İzotoplarının Toplam Kaçak Miktarları, Ci

İzotop	Zaman t , s				
	30	150	600	1500	3000
^{238}Pu	$1,3 \times 10^{-1}$	$6,4 \times 10^{-1}$	2,6	6,4	$1,3 \times 10^1$
^{239}Pu	$3,1 \times 10^{-2}$	$1,6 \times 10^{-1}$	$6,2 \times 10^{-1}$	1,6	3,1
^{240}Pu	$3,7 \times 10^{-2}$	$1,8 \times 10^{-1}$	$7,4 \times 10^{-1}$	1,8	3,7
^{241}Pu	4,1	$2,1 \times 10^1$	$8,2 \times 10^1$	$2,1 \times 10^2$	$4,1 \times 10^2$
^{242}Pu	$8,6 \times 10^{-5}$	$4,3 \times 10^{-4}$	$1,7 \times 10^{-3}$	$4,3 \times 10^{-3}$	$8,6 \times 10^{-3}$

Tablodaki değerlerden de görüldüğü gibi, hesaplama süresince plutonyum izotoplarının kaçak hızında çok az bir değişme olduğundan toplam kaçak miktarları zamanla hemen hemen lineer olarak artmaktadır.



Şekil 4 — Plutonyum İzotoplarının Kaçak Hızının Zamanla Değişimi

4. SONUÇ

Bu çalışmada; FTR'deki varsayımlı kalp bozulma kazasında buharlaşan yakıtın iç ve dış reaktör kapları içinde aniden yoğunlaşması ile meydana gelen aerosol taneciklerinin davranışları incelenerek, reaktör kapları atmosferindeki radyoaktif plutonyum izotoplarının aktivitesinin ve dış kaptan çevreye sızan plutonyum izotopları miktarının zamanla değişimi hesaplanmıştır. Hesaplamalarda yakıtın buharlaşma oranı, aerosol taneciklerinin ilk geometrik ortalama yarıçapı, kaçak hızı sabiti, iç kabın yüksekliği ve eşdeğer dış kabın yüksekliği parametre olarak alınmıştır. Bu parametrelere bağlı olarak bulunan reaktör kapları içinde yakıt aerosolunun kütle konsantrasyonu, radyoaktif plutonyum izotoplarının aktivitesi ve eşdeğer dış kaptaki plutonyum izotoplarının kaçak hızının zamanla çok yavaş değiştiği görülmüştür. Bunun sebebi, hesaplama süresince yakıt aerosol taneciklerinin çok az çökmesi ve yayılması ve plutonyum izotoplarının yarı-ömrünün çok uzun olmasıdır.

Kaza sonrası; plutonyum izotoplarının reaktör kapları atmosferindeki radyoaktiflik konsantrasyonlarının azalma hızı, Şekil 2 ve Şekil 3'te görüldüğü gibi, 10^{-11} – 10^{-10} mertebesinde dir. İç kap ve eşdeğer dış kap atmosferindeki plutonyum izotoplarının toplam radyoaktiflik konsantrasyonları, havadaki

maksimum müsaade edilebilir plutonyum konsantrasyonu ile karşılaştırılırsa aşağı yukarı $10^{13} - 10^{14}$ kat daha büyüktürler. Böyle bir atmosferde kimsenin yaşayamayacağından reaktör binasına uzun müddet girilmemesi gerekir.

Reaktör binasından belirli mesafelerde plutonyum dozunun bulunması için gerekli dış kaptaki plutonyum izotoplarının kaçak hızı, Şekil 4'de görüldüğü gibi, zamanla çok yavaş azalmaktadır. Kaçak hızında çok az bir azalma olduğundan çevreye sızan plutonyum izotoplarının miktarı Tablo 2'de görüldüğü gibi zamanla artmaktadır. Hesaplamalarda kaçak hızı sabiti % 1/gün olarak alınmıştır. Halbuki kaçak hızı sabiti reaktör kabı içindeki basınç ve sıcaklık değişimlerine bağlıdır. Dış kap içindeki basınç ve sıcaklığın düşmesi ile kaçak hızı sabiti de küçülecektir. Diğer taraftan plutonyum izotoplarının kaçış yollarında çökeltme ve yayınma olduğu da kabul edilirse reaktör dış kabından çevreye sızan plutonyum miktarında azalma olacaktır.

Bu çalışmada; yakıt aerosol tanecikleri, kararlı reaktör kapları atmosferinde incelenmiş ve ona göre plutonyum aktivitesi ve kaçığı hesaplanmıştır. Bundan sonraki çalışmalarda reaktör kapları içindeki basınç ve sıcaklığın değişimi de gözönüne alınarak yere ve zamana bağlı aerosol taneciklerinin davranışları incelenebilir. Bu incelemelere dayanarak da reaktör kapları içinde plutonyum aktivitesi ve dış kaptan çevreye sızan plutonyum miktarı hesaplanabilir.

KAYNAKLAR

1. Reactor Handbook, Vol. 3, 1955.
2. Kırbıyık, M., Garner, P.L., Refling, J.G. ve Reynolds, A.B.; Hydrodynamics of Post-Disassembly Fuel Expansion, Nuclear Engineering and Design. Vol. 35, No: 3, December, 1975.
3. Refling, J.G., Reynolds, A.B., Garner, P.L. ve Rao, S.P.; Nonequilibrium Evaporation and Condensation in Liquid Metal Fast Breeder Reactor Fuel Expansion, Nuclear Technology, Vol. 33, May, 1977.
4. Chan, S.H. ve Kocamustafaoğulları, G.; An Assesment of the Effect of Nonequilibrium Mass Transfer on HCDA Radiological Consequences, Trans. Am. Nuclear Society, Vol. 34, 526, 1980.
5. Gieseke, J.A., Behn, R.C., Ritzman, R.L. ve Gence, J.M.; Aerosol Source Term for Fast Reactor Safety Analysis, BMX-X-637, Batelle Columbus Laboratories, August, 1972.
6. Kennedy, M.F., Erdman, C.A., Garner, P.L., Reynolds, A.B. ve Waltar, A.E.; A First Generation Model to Predict Particle-Size Distributions for Condensed UO_2 Vapor, Trans, Am. Nuclear Society, Vol. 26, 339, 1977.
7. Schikarski, W., The Behaviour of Nuclear Aerosols in Closed Systems, KFK-1206, Specialist Meeting in Karlsruhe, November 11-12, 1969.
8. Van de Vate, J.F.; The Safety of SNR-300 and the Aerosol Model: A Summary Report of the RCN Aerosol Research 1967-1971, RCN-174, June, 1972.
9. Smoluchowski, M. von; Theorie der Koagulation, Z. Phys. Chem., 17, 557-583, 1916.
10. Fuchs, N.A.; The Mechanics of Aerosols, Rev. Ed., Pergamon Press, 1964.
11. Smoluchowski, M. von; Z. Phys. Chem., 92, 140, 1917.
12. Simpson, D.E.; Design and Evaluation of FFTF Containment, Nuclear Safety, Vol. 14, No. 5, September-October, 1973.
13. Fuchs, N.A. and Sutugin, A.G., Russian Chemical Reviews, 37, 855, 1968.
14. Reist, P.C.; Review of the Probable Characteristics of Aerosols Resulting from Accidental Loss of Sodium Coolant, NYO-841-18, Harvard Air Cleaning Laboratory, 1969.
15. Erdman, C.A., Kelly, J.L., Kırbıyık, M. ve Reynolds, A.B.; Radionuclide Production, Transport, and Release from Liquid-Metal-Cooled Fast Breeder Reactors, Univ. of Va., NE-1146-102-73, September, 1973.