

Plutonyum Ne Kadar Tehlikeli?



İkinci Dünya Savaşından sonra ortaya çıkan iki süper güç, nükleer silahlar sayesinde, nerede ise yarım yüzyıla yakın bir süre boyunca dünya barışını ve kendi çıkarlarını korudular. Sovyetler Birliğinin ekonomik ve sonra da politik olarak çökmesi, nükleer silahlar ile sağlanan ve hiç de sağlam olmayan Dünya barışını, umulmadık bir şekilde olumsuz yönde etkilemeye başladı.

Erol Çubukçu
Osman Kadiroğlu
H Ü Nükleer Enerji Mühendisliği Bölümü

SON zamanlarda radyoaktif madde kaçakçılığı ile ilgili haberler, basında artan bir sıklıkla yer almaya başladı. Önceleri, ne olduğu ve ne için kullanıldığı bir türlü saptanamayan, kırmızı civa pazarlandığı haberleri yer aldı. Bu malzemenin, nükleer teknolojiye yeri olmamasına karşın, nükleer silah yapımında kullanıldığı öne sürülerek astronomik fiyatlarla satıldığı belirlendi. Ardından, metal uranyum çubuklarının pazarlandığı haberleri basında yer aldı. Kırmızı civa olayında olduğu gibi, asılsız iddialar ortaya atılarak; bu malzemeler için de astronomik fiyatların talep edildiği öğrenildi. Son olarak da, yasadışı bir plutonyum piyasasının varlığı haberleri, hemen herkesi rahatsız etmeye başladı. Önce miligramlar mertebesinde, daha sonra da 300 g kadar plutonyum, Almanya'da ele geçirildi. Gazelerde yer alan haberlere göre kaçakçılar, 4 kg kadar plutonyumu pazarlamayı planlıyorlardı. Alman ve Avrupa basını, Ruslar'ın tüm itirazlarına karşın, nükleer araştırma merkezlerinin sonuçlarına dayanarak bu plutonyumun kaynağını, Rusya olarak belirlediler. Bunun üzerine Ruslar, nükleer silah depolarında ve nükleer mad-

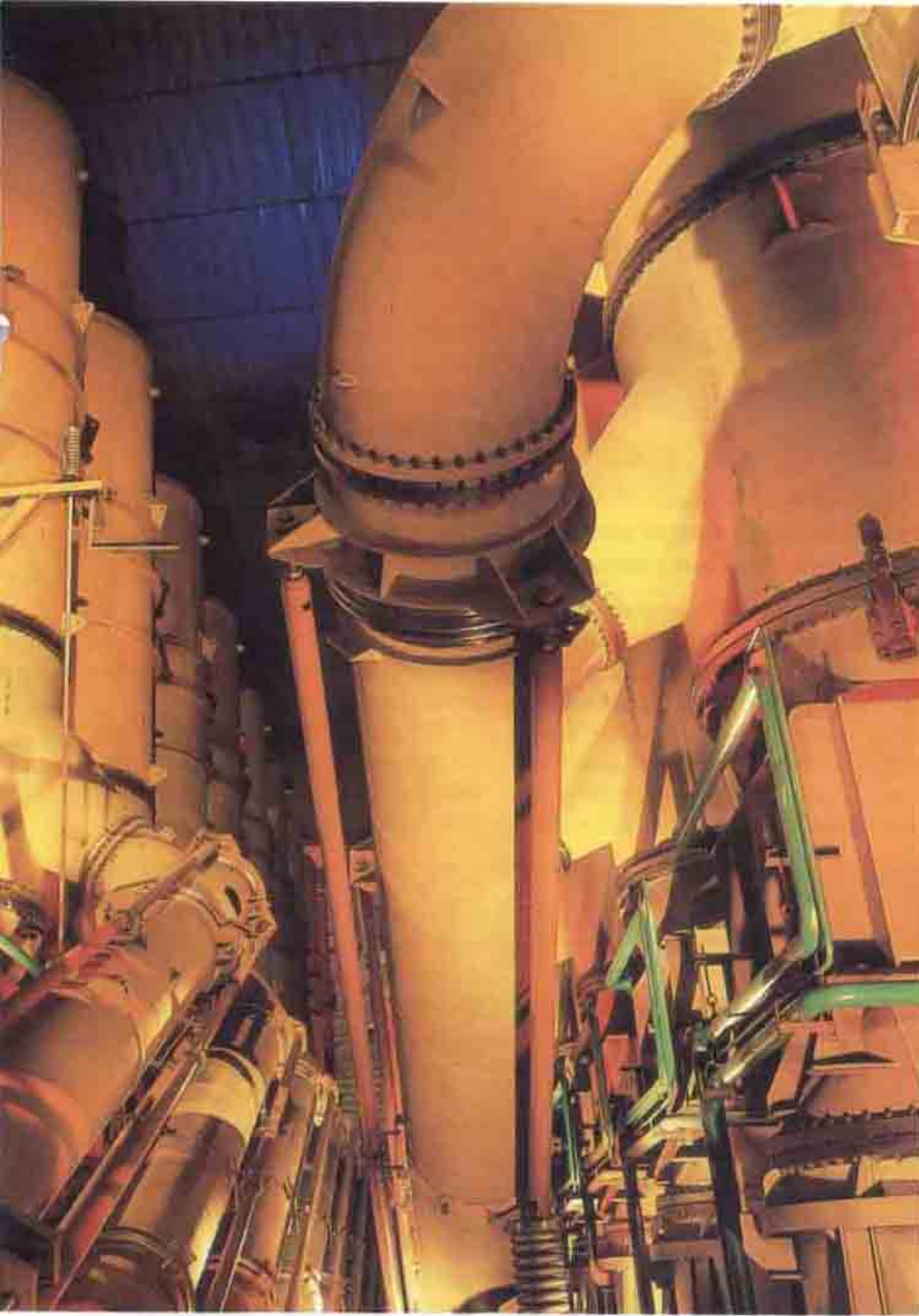


de kasalarında herhangi bir eksiklik olmadığını ısrarla belirtmekle beraber, kaçakçılık olayının sonuçlandırılmasında işbirliğine yanaştılar.

Kısaca hatırlattığımız bu radyoaktif madde kaçakçılığı haberlerinden sonra akla gelen ilk soru, sözü edilen bu radyoaktif maddelerin gerçekten ne denli tehlikeli olduklarıdır. İkinci önemli soru ise, bu maddelerin ne kadarının, kimlerin elinde, toplu katliamlara yönelik nükleer silahlara dönüştürülebileceğidir.

Nükleer Silahlar

Nükleer silahları askeri açıdan çok çekici kılan, bu silahların birim ağırlıkları başına, patlama sırasında ortaya çıkarttıkları enerjidir. Bir bombanın patlaması sonucunda ortaya çıkan enerji, çok kısa bir süre içinde, yakın çevresindeki ortamı ısıtarak bir şok dalgası yaratır. Bu şok dalgası, çevreye, dolayısıyla da hedefe zarar verir. Bir bombanın tahrip gücü, patlama sonucu çevreye eşit derecede zarar verecek kimyasal bir patlayıcı olan trinitro-tolüen'in (TNT) ağırlığı cinsinden verilir. Kimyasal patlayıcıların çevreye vereceği zarar ile nükleer bir patlayıcının verece-



patlayıcı vardır ve füze siloları yerine kentleri hedef alırlar. Kısacası nükleer güçler, karşı tarafın sivil halkını rehin almaktadır. Üçüncü sistem ise, KABF ve DABF sistemlerinin arasında devreye girebilen, insan kumandası ile çalışan ve gerektiğinde geri çağrılabilir nükleer silahlar taşıyabilen bombardıman uçaklarıdır.

Nükleer Bomba Nedir?

Nükleer bombaların çalışma ilkesi, iki ayrı tür çekirdek tepkimesine dayanır. Ağır çekirdeklerin parçalanması, yani fisyon olayı ile enerji üreten nükleer bombalara, yanlış bir terim olmasına karşın, Atom Bombası denilmektedir. Diğer bir bomba tipi ise, açığa çıkardığı enerjinin çoğunluğu hafif çekirdeklerin kaynaşmasına; yani füzyon tepkimesine dayanan, termonükleer bomba ya da Hidrojen Bombasıdır. Henüz geliştirilme aşamasındaki çok yeni tasarımlar dışında, termonükleer bombaların ateşlenmesinde fisyon tepkimesinden yararlanılır. Diğer bir deyişle hidrojen bombasının tetik mekanizması bir atom bombasıdır. Dolayısıyla nükleer silahların yapılabilişliğini incelemeye, atom bombası yapımı için gerekli malzeme ve teknolojinin neler olduğunun belirlenmesi yeterlidir. Fisil, yani bölünebilir madde adını verdiğimiz uranyum izotoplarından U^{235} ve U^{238} ile insan yapısı olan plutonyum izotopu Pu^{239} , nükleer silahların ham maddeleridir. Uygun miktar ve geometride bir araya getirilen bu malzeme

ği zarar arasında binler veya milyon mertebesinde bir fark vardır. Örneğin, Amerikan Minuteman-III Kıtalar Arası Balistik Füzesi içinde bulunan, her biri 170 kt gücünde, ağırlığı yaklaşık 400 kg'dan az olan W62 nükleer başlıkları, patlama sonucu 170,000 ton TNT'e eşdeğer bir enerji açığa çıkarırlar. Diğer yandan, dünyadaki en güçlü nükleer bombalar, Çinlilerin CSS-4 sistemleri olup; güçleri 5-10 Mt (5-10 milyon ton TNT'ye eşdeğer) dolayında, ağırlıkları ise 5 tondan azdır.

Nükleer silahları, güç-ağırlık oranları çekiçi yapmaktadır. Askeri dilde taşıma platformları olarak anılan, uçak veya füze teknolojisine sahip uluslar için nükleer patlayıcılar, çok uzaktaki hedefleri vurabilme olanağı vermeleri açısından büyük önem taşımaktadırlar.

Nükleer silahların caydırıcı rolünün bir göstergesi, yarım yüzyıla yakın bir süredir bozulmayan Dünya barışıdır. Nükleer si-

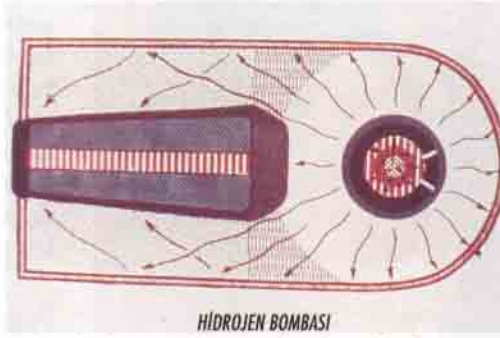
lahlara sahip bir ülke, benzer bir saldırının kendisine de yapılacağı kabusu ile yaşamak zorundadır. Bu nedenle nükleer silah sistemleri, "sac ayağı" olarak tanımlanan, bir üçlü sistemden oluşur. İlk sistem, düşmanın Kıtalar Arası Balistik Füze (KABF) silolarını hedef alan KABF sistemidir. Bu sistem, planlanmış bir saldırıda ya da saldırı karşısında savunma amacı ile kullanılabilir. ABD ve eski SSCB, karşılıklı olarak ilk saldırıda bulunmama garantisi vermiş ve KABF sistemlerini salt kendilerine yapılacak bir saldırı karşısında kullanma kararını benimsemişlerdir. Bir nükleer savaşın ilk yirmi dakikasında, KABF'lerin çoğunluğunun imha edilmesi ve bunların çevreye çok büyük zararlar vermesi olasılığına karşılık, daha çok intikam alma amacına yönelik olan Denizaltından Atılan Balistik Füze (DABF) sistemi geliştirilmiştir. Bu füzelelerde, KABF başlıklarına oranla daha güçlü olan çok sayıda nükleer

Titon II Füzesi:
Bu sıvı yakıtlı füzelelerden her biri ayrı bir başlık taşır. Ağırlıkları 150 t., uzunlukları 30 m. dir.





PLUTONYUM BOMBASI
Plutonyumun küresel merkezi çevresinde bulunan kimyasal patlayıcılar aynı anda patlarlar.



HİDROJEN BOMBASI
Hidrojen bombasının içindeki enerji üç kaynaktan gelir: plutonyum bombasının patlaması, döteryum-trityum füzyonu ve uranyum fisyonu.

melerde fisyon tepkimesi, bir nötron kaynağı yardımı ile başlatılır. Kaynaktan çıkan bir nötron, fisil madde ile fisyon tepkimesine girerek, fisil maddenin çekirdeğinin parçalanmasına yol açar. Bu tepkime sonunda, yüksek kinetik enerjiye sahip (fisil maddenin çekirdeğine göre) iki hafif çekirdekte başka, iki veya üç tane de

nötron ortaya çıkar. Ortaya çıkan bu nötronlardan bazıları, sistemdeki diğer fisil çekirdeklerle fisyon tepkimesine girmeksizin sistemi terk ederler. Sistemden kaçan nötronların fisyon tepkimesine girenlere oranı, sistemin fiziksel büyüklüğü ile ters orantılıdır. Fisyon tepkimesinden çıkan nötronlardan bir kısmı ise, fisil madde-

de veya sistemdeki diğer maddelerde fisyon yapmayacak tepkimelerle yutulurlar. Sızma ve yutulma kayıplarından arta kalan nötronlar yeniden fisyon tepkimesi yaratırlar. Eğer sistemde yeterli fisil madde varsa ve seçilen geometri uygunsa, ard arda gelişen (zincirleme) fisyon tepkimeleri sonucu, sistemdeki nötron sayısı zamanla artar. Hızla oluşan bu zincir tepkimeleri sonucu, çok büyük bir ısı açığa çıkar. Sıcaklığı artan sistem genişleme eğilimi gösterir ve sistemden sızan nötronların oranı artar; bunun sonucu olarak da zincirleme tepkimeler sona erer. Dolayısı ile, nükleer bomba tasarımında en önemli konu, malzeme ve geometri seçiminin, zincirleme tepkimeyi mümkün olduğunca uzun süre devam ettirecek şekilde yapılmasıdır.

Nükleer sistemler tasarlanırken, nötron sızıntısının en aza indirilebilmesi amacıyla genelde küresel geometri yeğlenir. Küre, bütün geometrik cisimler içinde, ha-

Plutonyum Üretimi ve Kullanımı

Okan Zabunoğlu
H Ü Nükleer Enerji Mühendisliği Bölümü

Bir nükleer reaktörde uranyum-238'in nötron yutması sonucu plutonyum-239 oluşur. Oluşan plutonyum-239, bir yandan fisyon yaparak enerji üretimine katkıda bulunurken bir yandan da nötron yutmaya devam ederek plutonyum-240, plutonyum-241 ve plutonyum-242 izotoplarına dönüşür. 1000 MW-elektrik gücündeki tipik bir hafif su soğutmalı nükleer reaktörden çıkan kullanılmış yakıt yaklaşık %95.5 Uranyum, %3.5 fisyon sonucu oluşan hafif elementler, %0.1 uranyum ötesi ağır elementler ve yalnızca %0.9 oranında plutonyum içerir. Bu plutonyumun %59'u Pu-239, gerisi diğer plutonyum izotoplarıdır. Bu izotoplardan yalnızca plutonyum-239 enerji üretiminde ya da bomba malzemesi olarak kullanılabilir. Bomba malzemesi olarak kullanılacak plutonyumun %90'dan fazla plutonyum-239 içermesi gerektiğinden, yüksek izotopik saflıkta plutonyum-239 (bomba malzemesi) elde etmek için özel üretim reaktörleri geliştirilmiştir. İlk plutonyum üretim reaktörü, 2. Dünya Savaşı sırasında tasarlanmış ve Şubat 1945'de Hanford'da (A.B.D.) günde 1 kg plutonyum üretmek üzere çalışmaya başlamıştı. Plutonyum üretim reaktöründen elde edilen malzeme de önemli miktarlarda uranyum, fisyon ürünü hafif elementler ve uranyum ötesi ağır elementler içerir. Bu karışımın içinden son derece yüksek saflıkta plutonyum elde edilmesi kimyasal ayrıştırma yöntemlerini gerektirir. Bu amaçla uygulanan ilk

yöntem, bizmut fosfat (BiPO₄) ile çöktürme yöntemi olmuştur. Hanford'da üretilen karışımın saf plutonyum eldesi, yine aynı yörede kurulan bir bizmut-fosfat ile çöktürme tesisinde gerçekleştirilmiştir. Bizmut-fosfat ile çöktürme yöntemi, çeşitli dezavantajlara (düşük verim, fazla kimyasal madde tüketimi, fazla atık üretimi ve uranyumun geri kazanılamaması) sahip olduğundan, daha sonraları bu yöntemden vazgeçilmiş ve "Çözücü (solvent) Ekstraksiyonu" yöntemleri kullanılmaya başlanmıştır.

Günümüzde Purex adı verilen ve çözücü olarak tri-bütül-fosfat kullanan solvent ekstraksiyonu yöntemi plutonyum üretim reaktörlerinden elde edilen karışımın ve kullanılmış nükleer yakıtların işlenmesinde (reprocess) rakipsiz olarak uygulanmaktadır. Purex yönteminde kullanılmış nükleer yakıtlar, önce nitrik asit (HNO₃) ile çözülür; daha sonra organik tri-bütül-fosfat çözeltisi ile temasa geçirilerek nitrik asit fazındaki uranyum ve plutonyum organik faza çekilir (ekstraksiyon). Bu şekilde hafif elementlerden (ve aktiviteden) annan uranyum ve plutonyum karışımına bir indirgeyici madde eklenerek uranyum ve plutonyumun birbirlerinden ayrılması sağlanır. Sonuçta temiz ve saf uranyum ile plutonyum ayrı ayrı çözeltiler halinde elde edilir. Böylece geri kazanılan uranyum ve plutonyum, gerekli kimyasal dönüştürme ve fabrikasyon işlemlerinden sonra tekrar nükleer reaktörlere yüklenerek enerji üretimine önemli ölçüde katkı sağlanabilir.

Nükleer reaktörler bir yandan enerji üretirken bir yandan da tükettiklerinden daha fazla

yakıtı; uranyum-238'in plutonyum-239'a dönüşmesinden yararlanarak üretecek şekilde de tasarlanabilirler. Bu tür reaktörlere "üretken reaktörler" adı verilir. Normal reaktörler uranyum-235 tüketirken, üretken reaktörler, yalnızca uranyum-238 tüketirler. Doğal uranyumun %99'dan fazlasını fisil olmayan uranyum-238'in ve yalnızca binde 7 kadını fisil uranyum-235'in oluşturduğu hatırlanırsa, üretken reaktörlerin son derece değerli nükleer hammadenin (fisil malzeme) en verimli şekilde kullanılması yolunu olası kılacağı görülebilir. Üretken reaktörlerde üretilen plutonyum-239'un, enerji üretmek üzere tekrar kullanılabilmesi için, reaktörden çıkan yakıtın yine bir kimyasal ayırma (Purex) tesisinde işlenerek, plutonyum-239'un yakıt karışımından ayrılması gerekir. Üretken reaktör teknolojisinin benimsenmesi halinde kimyasal ayırma, nükleer yakıt çevriminin vazgeçilmez bir parçası olacak ve nükleer reaktörlerden elektrik enerjisi üretiminde asıl rolü, uranyum-235 yerine plutonyum-239 üstlenmeye başlayacaktır.

Plutonyum, elektrik enerjisi üretimi için ve nükleer bomba malzemesi olarak kullanılmasının yanı sıra, ısı kaynağı olarak da kullanılabilir. Bu uygulama için plutonyum-238 izotopundan yararlanılır. Saf plutonyum-238 izotopu, nükleer reaktörlerden çıkan kullanılmış yakıttan kimyasal ayırma yolu ile geri kazanılabilen neptunyum-237'nin ışınlanması (radyasyona maruz bırakılması) ile elde edilebilir. Plutonyum-238, uzay programlarında (Apollo gibi), iletişim uydularında kullanılan termoelektrik güç üreteçlerinde ve kalp pillerinde, ısı kaynağı olarak kullanım alanı bulmuştur.

cim başına en az yüze sahip olanıdır. Tümyle fisil maddeden oluşan bir kürenin çapı büyüdükçe, sızan nötronların oranı azalmaktadır. Kullanılan fisil malzemeye bağlı olarak değişen, belli çaptaki bir kürede her bir fisyon olayından doğan nötronlardan en az biri, yeni bir fisyon tepkimesine yol açarak, zincirleme tepkimelerin oluşmasını sağlar. Böyle bir sisteme kritik kütle adı verilir. Kürenin çapı, kritik çaptan büyük ise, her bir fisyon olayı, birden fazla fisyon tepkimesine yol açar. Bu durumda zincirleme tepkimeler artarak devam eder. Bu tip sistemlere kritik-üstü adı verilir. Kürenin çapı kritik değerın altındaysa, zincirleme tepkimeler oluşamaz ve böyle sistemler kritik-altı sistemler adı ile anılır.

Nükleer bir bombanın yapımı sırasında kritik kütle oluşturacak kadar fisil maddeyi bir küre halinde bir araya getirmeye çalışmak, patlamaya yol açar. Bu nedenle, nükleer silahların içine konan fisil madde, normal koşullardaki yoğunluğunda zincirleme tepkimeye izin vermeyecek kadar küçük bir metal küre halindedir. Bu metal küre, bombanın patlaması için, kimyasal patlayıcılar yardımı ile sıkıştırılarak, çok daha yoğun; ancak daha küçük bir küre haline getirilir. Kürenin yoğunluğunun artması ile nötron sızıntısı azalır ve çok hızlı gelişen zincirleme tepkimeler, nükleer patlamaya neden olur.

Bir nükleer bombanın yapımı için, yalnızca fisil malzemeye sahip olmak yeterli değildir. Fisil maddeden yapılmış kürenin sıkıştırılabilmesi için, kimyasal patlayıcıları

leer silahların içine konan fisil madde, normal koşullardaki yoğunluğunda zincirleme tepkimeye izin vermeyecek kadar küçük bir metal küre halindedir. Bu metal küre, bombanın patlaması için, kimyasal patlayıcılar yardımı ile sıkıştırılarak, çok daha yoğun; ancak daha küçük bir küre haline getirilir. Kürenin yoğunluğunun artması ile nötron sızıntısı azalır ve çok hızlı gelişen zincirleme tepkimeler, nükleer patlamaya neden olur.



senkronize olarak ateşleyecek düzeneklerin yapımı, bu alanda ileri bir teknolojiye sahip olmayı gerektirmektedir.

Fisil Madde

Nükleer bombalarda kullanılacak fisil maddelerden günümüzde en çok tercih edileni, plutonyumdur. Nükleer silahlara sahip olan bütün ülkelerin bombaları plutonyumdan yapılmıştır. Plutonyumun (daha doğru kullanımı ile Pu²³⁹'un) fisyon başına ürettiği nötron sayısı, diğer fisil maddelere oranla daha fazladır. Bu da, daha az malzeme ile kritik kütle elde edilebilmesine olanak verir. Pu²³⁹, yarı ömrü 24 000 yıl olan kararsız bir çekirdek olması nedeniyle, doğada bulunmaz. Doğal uranyumun % 99,3'ünü oluşturan ve fisil olmayan bir izotop olan U²³⁸'in nükleer reaktörlerde nötronlarla ışınlanması ile elde edilir. Pu²³⁹ üre-

Plutonyumun Sağlık Etkileri

Sinan Göktepe
H U Nükleer Enerji Mühendisliği Bölümü

Plutonyum (Pu), gümüş renginde, ağır bir metaldir. Bilinen 16 izotopu vardır. Bunlardan en uzun yarı ömre sahip olanları, sırasıyla, 24 390 yıla Pu²³⁹, 6580 yıla Pu²⁴⁰, 86,4 yıla Pu²⁴¹ ve 13,2 yıla Pu²⁴²'dir. Plutonyumun biyolojik etkileri konusundaki tahminler, kimyasal, fiziksel veya biyolojik özellikleri konusundaki bilgilere, işleme sırasında ve nükleer silahların yol açtığı serpintilerden elde edilen verilere ve meydana gelen kazalar sırasında maruz kalan kişilerde gözlenen etkilerden elde edilen verilere dayanır. Plutonyumun fizyokimyasal özellikleri, zehirlilik ve zararlılık miktarını belirler. Kimyasal aktivitesi yüksektir.

İnsan vücuduna iki ana yolla girebilir: besin yoluyla ve havadan solunma yoluyla. Plutonyum saf ve toz halinde solunduğunda, %25'i akciğerlerde, %38'i üst solunum yollarında birikir ve geri kalanı da dışarı atılır. Bir kaç saat içinde, üst solunum yollarında birikmiş olanın tamamı, akciğerlerde birikmiş olanın da %40'ı temizlenir. Solunum yoluyla alınan toplam miktarın %15'i kadar plutonyum, iki yıl kadar bir süre akciğerlerde kalır. Bu bölgede biriken plutonyum, 2000 rem/μCi miktarında maruziyete yol açar. Japonya'da atom bombasından sonra hayatta kalanlar, radon gazına maruz kalmış ma-

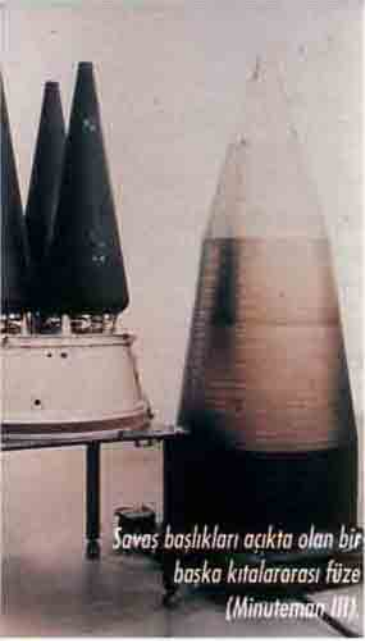
denciler ve maruziyet görmüş diğer insanlar üzerinde yapılan çalışmalardan yola çıkılarak, akciğerin maruz kaldığı her milirem radyasyon için kanser riski hesaplanmıştır. Bu değere göre beklenen kanserlerin sayısı, solunan her yarım kilo plutonyum için, 2 milyon dolaylarında hesaplanmıştır. Bu rakam, plutonyumun bir çok diğer maddeye göre daha az zararlı olduğunu gösterir. Besin yoluyla alındığında, çok az bir miktarı bağırsaklar tarafından emilebilir; çoğu dışkı aracılığı ile vücuttan atılır. Genellikle alfa ışınları yaydığından, bağırsaklarda küçük bir alan radyasyona maruz kalır. Bu nedenle plutonyumun vücuda besin yoluyla girmesi, solunmasından 5000 kat daha az tehlikelidir. Bir miktar plutonyum yiyen bir insanla, aynı miktar kafein yiyen bir diğeri, eşit miktarda tehlikeye maruz kalırlar.

Olasılığı düşük olmasına karşın, plutonyumun açık bir yara yoluyla doğrudan kana karışması konusuna da değinmek gerekir. Yapılan deneylerden elde edilen sonuçlara göre, damardan enjekte edilen plutonyum bileşikleri, genellikle damarlarda birikmektedir. Bu deneylerden elde edilen veriler, doğrusal bir doz-tepki modeli kullanılarak değerlendirildiğinde, iskelet sistemi plutonyum kaynaklı 1 rad'lık maruziyet gören 1.000.000 insan arasında, 200 ke-

mik kanseri görüleceği tahmin edilmiştir.

Plutonyumun insan vücuduna girebilmesi için çeşitli fiziksel koşulların sağlanması gerekmektedir. Yarım kilo plutonyum tozu havaya saçıldığında yere çöker ve insanların çoklukla bulunduğu bir yerde (örneğin şehir merkezinde) bile, ancak 100 000'de biri kadar solunabilir. Bu da 19 kanser vakası için yeterli bir miktardır. Eğer insanlar bu serpintiden haberdar edilmişlerse, yüzlerini bir parça katlanmış bezle örttikleri takdirde, bu sayı 19'dan 3'e düşer. Rüzgar nedeniyle plutonyum tozunun tekrar havalanması durumunda, plutonyumun sebep olacağı 7 kanser vakası daha beklenebilir. Toprağa karışan plutonyum ise, toprak üzerinde yapılan tarım, inşaat gibi faaliyetler nedeniyle yeniden havaya karışacaktır. Bunun, serpintiden sonraki yıllarda bir tek kansere yol açma olasılığı %20'dir. Topraktaki plutonyumun, bitki kökleri tarafından emilerek insan besinlerine karışması sonucu 1 kansere daha yol açması beklenebilir. Tüm bu rakamların toplamı, yarım kilo plutonyumun serpinti halinde yayılması durumunda, en fazla 27 ölüme yol açacağını göstermektedir.

Bir nükleer bombada bulunan plutonyumun %20'si fisyon yapar, kalanı ise saf toz olarak atmosfere yayılır. Günümüze kadar yapılan nükleer bomba denemelerinden, bu yöntemle, atmosfere 5000 kilo kadar plutonyum yayılmıştır ve bunun 4000 kadar kanser vakasına yol açması beklenmektedir. Rakamın, yukarıda belirtilenden küçük olmasının nedeni, denemelerin insanlardan uzak ve tarım yapılmayan yerlerde gerçekleştirilmesidir.



Savaş başlıkları açığa olan bir başka kıtalararası füze (Minuteman III)

tebilmek için bir nükleer reaktör ve bir kimyasal ayırıştırma tesisi gerekirken; U^{235} , ancak çok pahalı olan izotop zenginleştirme yöntemlerinin kullanılması ile elde edilebilir. Nükleer bomba hammaddesi olarak kullanılabilen diğer fisil madde U^{235} , doğada bulunmadığından, yine Pu^{239} 'a benzer yöntemlerle üretilebilmektedir. U^{235} üretimi için, toryumun doğada bulunan tek izotopu olan Th^{232} , bir nükleer reaktörde nötronlarla ışınlanır. Daha sonra kimyasal ayırıştırma gerektiren

bu işlem, ortaya çıkan yan ürünlerin daha fazla radyoaktif olmasından dolayı Pu^{239} üretiminden daha zordur. Bu nedenle pek kullanım alanı bulamayan bu izotop, nükleer silah sahibi devletler için cazip bir alternatif değildir. Fisil uranyum izotopları, yalnızca nükleer silah teknolojisine gizlice girme amacı taşıyan az gelişmiş ülkelerin ilgi duyabileceği maddeler olabilir.

Plutonyum

Glenn Seaborg tarafından 1940 yılında keşfedilen 94 atom numaralı bu element, yapay olarak üretilmektedir. Doğada eser miktarlarda bulunan ve saptanması bile çok güç olan plutonyum, kimyasal olarak aktinidler sınıfına dahildir. Uranyumun 238 ağırlıklı izotopunun nötron yutması sonucu oluşan kararsız U^{239} çekideği, ard arda iki beta

ışınması yaparak Pu^{239} 'a dönüşür. Bir nükleer reaktörde bulunan U^{238} çekirdeklerinin tümünün, nötron yutar yutmaz reaktörden çıkartılmasına olanak yoktur. Bunun sonucu oluşan plutonyum uzun bir süre nötron bombardımanı altında kalır. Pu^{239} , nötronlarla fisyon tepkimesine girebildiği gibi; nötron yutup gama ışınması yaparak daha ağır bir izotop olan Pu^{240} 'ı oluşturur. Pu^{239} fisil bir izotop olmadığından, reaktörde uzun süre bekleyen plutonyumun nükleer silah yapımı açısından kalitesi düşer. Pu^{240} da nötron yutarak, nükleer silah yapımı için Pu^{239} kadar elverişli olmayan daha ağır plutonyum izotoplarının (Pu^{241} ve Pu^{242}) açığa çıkmasına neden olur. Elektrik üretiminde kullanılan nükleer santrallerde, yakıtlar uzun süre reaktörde kaldığı için, bu santrallerden elde edilecek plutonyum, nükleer silah yapımı için uygun değildir. Askeri amaçlı pluton-

Kritik Kütle Hesabı

Mehmet Tombakoğlu
HÜ Nükleer Enerji Mühendisliği Bölümü

Nükleer bir bombanın yapımında kullanılan fisil malzemenin miktarı, bombanın tasarımına bağlı olmakla birlikte; minimum oranda kullanılması gerekli olan fisil malzeme miktarını basit bir hesapla bulmak mümkündür. Bu yazıda basit olarak kritik kütle hesabının nasıl yapıldığı anlatılacaktır.

Temelde, kritik kütle tanımını, zincirleme fisyon tepkimesinin başladığı andan itibaren sürekli devam ettiği bir sistemde bulunması gereken minimum fisil madde miktarı, şeklinde yapmak uygun olacaktır. Fisil maddeden anladığımız, fisyon yapabilen izotoplardır. U^{235} , U^{233} , Pu^{239} ve Pu^{241} örnek olarak verilebilir. U^{235} ve Pu^{239} izotopları saf olarak bulunmadıkları için pek fazla önem taşımazlar.

İlk atom bombasının yapımı sırasında kritik kütle hesabı konusunda yapılan tahminler sürekli olarak değişmiş ve sorun yaratmıştı. Sorun temelde bu izotopların nötronlara ne denli büyük görünümlerinin bir ölçüsü olan etkin tesir kesitleri ve fisyonundan açığa çıkan ortalama nötron sayısı ile ilgili verilerin yetersizliğinden kaynaklanmaktaydı. Bir diğer sorun ise, bu izotopların kendiliğinden fisyon yapmasından dolayı, kof patlama olasılığının bulunmasıydı. Sonuç olarak, bir bomba için gerekli kritik kütle hesabını belirleyen unsurlar şunlardır:

- Fisil malzemenin nötronik özellikleri,
- Fisil malzemenin kimyasal formu,
- Fisil malzeme içindeki izotopların miktarı,
- Fisil malzemenin yoğunluğu,
- Geometri,
- Reflektör malzemesinin çeşidi ve kalınlığı,
- Kimyasal patlayıcının kalınlığı.

Tüm bu unsurlar kritik kütle hesabında önemli rol oynamakta birlikte; etkili bir bomba'nın yapımında, tasarım aşaması ile ilgili diğer unsurlar daha fazla önem kazanmaktadır.

Kritik kütle hesabının bulunması için üretilen nötron sayısının, tüketilen nötron sayısına eşit olması gerekmektedir. Bu sayede zincirleme tepkime oluşur. Bunun anlamı, fisyonundan açığa çıkan nötron sayısının yutulanlara ve sistemden sızanlara eşit olmasıdır.

$$\text{Kısaca } k_{\text{eff}} = \frac{\text{üretilen nötron sayısı}}{\text{tükenen nötron sayısı}} = \frac{v \Sigma_f}{\Sigma_a + DB^2}$$

Bu denklemdeki v , bir fisyon olayı olmasından sonra açığa çıkacak ortalama nötron sayısını, $\Sigma_f = n_{\text{atom}} \sigma_f$ nötronlarının fisyon yapma olasılığını ve $\Sigma_a + DB^2$ ise nötronların sistemde yutulma ve sistemden sızma olasılığını ifade etmektedir. Bu denklem kullanılarak belli bir fisil malzeme için kritik kütle hesabı yapılabilir.

Geometrinin tanımlanması da gereklidir. Bunun için de minimum yüzey ve maksimum hacime sahip bir geometri seçilerek, DB^2 terimi ile hacim minimize edilebilir. Bu hesap yapıldığında optimum geometrinin küre olduğu bulunur. Homojen bir sıkıştırma yapmak için uygunluğu da düşünüldüğünde bu, bom-

banın şekli hakkında da bize bilgi verecektir. Optimizasyonun sonucu olarak çıplak yani reflektörsüz bir bombanın hesabını yapacak olursak

$$R_{\text{kritik}} = \sqrt{\frac{3\sigma_a \sigma_f}{\pi} \left(\frac{v \sigma_f}{\sigma_a} - 1 \right)}$$

bulunur.

Yukarıdaki denklemin sağ tarafı bütünüyle fisil malzemenin nötronik özelliklerine bağlı olup; bize kürenin yarıçapı ile malzemenin atom yoğunluğunun çarpımını vermektedir. Ancak bu hesaplar sonucu bulunacak kritik kütle hesabı nükleer silah yapımı için gerekli olan kritik kütle gibi düşünülmeli, yanlış olacaktır. İleri teknolojiye sahip ülkelerin bomba yapımı için gerekli olan kritik kütle hesabını ya da daha aza ile bomba yapımını gerçekleştirmeleri atom yoğunluğunu artırarak olası hale gelebilir.

Ne var ki teknoloji gelişmemiş ülkelerin bunu yapması mümkün gözükmemektedir. %5 zenginlikte plutonyum Pu^{239} içeren bir malzeme küresel hale getirilerek, çevresine 10 cm'lik bir uranyum reflektör konursa 60 ± 6 kg malzeme kritiklik içinde yeterli olacaktır. Alfa fazında saf Pu^{239} kullanılacak olursa; 4.5 ± 0.1 kg malzeme, aynı şekilde saf U^{235} kullanılırsa yaklaşık 16 kg malzeme gerekli olacaktır.

Berilyum reflektör kullanılırsa yaklaşık 16 kg malzeme gerekli olacaktır. Bu durumda kritik kütle miktarı ile birlikte bombanın tesir gücü de azalmakta (2.47 kg); bu nedenle de berilyum reflektör tercih edilmemektedir.

yum (Pu^{239} bakımından zengin), özel olarak tasarlanmış reaktörlerde, U^{235} 'in ışınlanması ile üretilir.

Ele geçirilen plutonyumun analizi, izotop üretim reaktörlerinin yapısı ve kimyasal süreçlere ilişkin verilerle birleştirildiğinde, plutonyumun kaynağı ile ilgili çıkarımlar yapılabilir. Nükleer silah üretiminde, genellikle % 90'ın üzerinde Pu^{239} içeren plutonyum kullanılır. Bu zenginlikte plutonyumdan yapılacak en ilkel bomba için en az 10 kg plutonyuma gereksinim vardır. Daha gelişmiş bir tasarım ile bu miktar, 4 kg'a kadar indirilebilir. Bir nükleer bomba yapımı için gerekli fisil malzeme miktarını azaltmak, ancak teknolojiye deneyim ve ilerleme ile olasıdır. Başka bir deyişle, nükleer bomba yapmak için plutonyum elde eden tarafın, çok geniş teknolojik olanakların yanı sıra deneye de sahip olması gerekmektedir. Terör örgütlerinin, ele geçirecekleri bir kaç kilo plutonyum ile nükleer bir silah yapmaları son derece zor olacaktır. Yine de kaçak olarak elde edilebilecek plutonyum, nükleer silahlar konusunda uzun süre çalışma yapmış, gelişmekte olan ülkeler için cazip olabilir.

Basında son zamanlarda yer alan, Al-



many'a da ele geçirilmiş birkaç miligram veya 300 g plutonyumun, askeri bir değeri yoktur. Bu miktarlarda plutonyum ile nükleer silah yapmaya olanak yoktur. 4 kg dolayındaki miktarlar ise, çok düşündürücü olabilir. Gerekli teknolojiye sahip ülkeler için bu miktarlar, nükleer silah yapmaya yeterli olabilecektir. Ne var ki nükleer silah konusunda düzenli bir program yürütme şansı olmayan terör örgütleri için, çok daha büyük miktarlar gerekmektedir.

Dünya atmosferinde halen, nükleer patlamalar sonucunda buharlaşarak, kullanılmayarak açığa çıkan beş ton kadar plutonyum bulunduğu tahmin edilmektedir.

Nükleer silahlar geliştikçe, içlerine konan plutonyumun daha büyük bir çoğunluğunun fisyon tepkimesinde kullanılmayacağına karşın, geçmişteki nükleer denemeler de göz önüne alınırsa, ortalama olarak nükleer bombalardaki plutonyumun yaklaşık % 20'sinin kullanıldığını söylemek olasıdır.

Dünya atmosferinde böylesine çok miktarda bulunduğu tahmin edilen plutonyumdan, bugüne kadar hiçbir insanın zehirlendiği bildirilmemiştir. Yinelemek gerekirse plutonyumun zehirleyici özelliği, insan vücuduna hangi yolla, hangi kimyasal bileşik halinde girdiğine bağlıdır. Madeni haldeki plutonyumun zehirleyici özelliği çok düşük olduğundan, birkaç kg plutonyum, terör örgütlerinin amaçladıkları toplu ölümleri sağlamaya yeterli olmamaktadır. Solunum dışı yollarla vücuda giren plutonyum, çok daha ucuz, çok daha etkili zehirli kimyasal bileşikler elde etmenin olası olduğunu vurgulamak gerekir.

Hiçbir terör örgütü, zehir olarak kullanma amacı ile plutonyum elde etmeye çalışmayacaktır. Terör örgütlerinin ilgisini çeken, akut ölümlere yol açan, çabuk etki gösteren silahlardır. Bu tür kimyasal bileşikler elde etmek veya küçük atölyelerde birkaç kişiden oluşan gruplarla üretmek, plutonyumdan zehir üretmeye oranla çok daha ucuz ve kolaydır.

Kaynaklar
Adaman Plades A.G., Braun C., Kenton J.E., Rahn F.J., A Guide to Nuclear Power Technology.
Cohen Bernard L., Before It's Too Late.
de Voloy A.Dy., Proliferation of Plutonium and Policy, 1979.
Duderstadt J.J., Hamilton L.J., Nuclear Reactor Analysis, 1976.

Zehirli Plutonyum

Ne yazık ki sansasyon yaratma amacı güden bazı basın kurumlarının gerçekle bağdaşmayan telkinleri ve konunun uzmanı olmayan kişileri kaynak göstererek verdikleri bilgiler doğrultusunda, kamuoyunda plutonyumun nükleer silah yapımının yanı sıra zehir olarak da kullanılabilirliği yolunda genel bir kanı oluştu. Gerçekten de zehirli bileşikler oluşturabilen bu elementin, zehirlilik boyutunu incelemekte yarar vardır.

Plutonyumun zehirleyici özelliği, insan vücuduna hangi yolla ve hangi kimyasal bileşik halinde girdiğinde bağlıdır.

