

# NÜKLEER SANTRAL GÜVENLİĞİ

## I. BÖLÜM

### •TMI RAPORU"

Metin BEYNAM  
Elk.Yük.Miih.

#### ÖNSÖZ

Ülkemizde bir nükleer elektrik santralının kurulması çalışmaları ile birlikte, nükleer santral in n güvenliği konusu da gündeme gelmiş bulunmaktadır. Gerek kamuoyu, gerekse mühendislik ve elektrik mühendisliği topluluğu, bu konuda yeterince aydınlanmış bulunmamaktadır, özellikle Üç Mil Adası (TMI) olayından sonra, nükleer reaktörlerin güvenlik ve güvenilirliği yönün eleştirilere hedef olmuştur.

TMI, nükleer elektrik santralleri konusunda bir dönüm noktası oluşturmaktadır. O kadar ki, bu konudaki tartışmalar TMI öncesi ve sonrası olarak, iki aşamada sürdürülmektedir. Üç Mil Adası'nda ne olmuştur? Su konu neden bu kadar önem taşımaktadır? Reaktör güvenliği sorununa etkisi nedir? Reaktörlerde TMI dışında başka kazalar da olmuş mudur? Bunlar ne derece ciddidir ve ne şekilde değerlendirilmelidirler? Bu ve başka soruların şimdiye dek yeterince tanıtılmış olduğu kuşkuludur.

Konunun güçlüğü, bir noktada başvuru kitaplarının yokluğundan kaynaklanmaktadır. Kaza ve arızalarla ilgili bilgiler, genellikle süreli yayınlar içinde çeşitli yerlere serpilmiş bulunmakta ve bir arada, derli toplu elde edilmeleri kolay olmamaktadır.

Bu yazıda bu eksikliğin giderilmesi amaçlanmıştır. Geniş bir literatür taraması ile elde edilen bilgiler, konu ve önemleri çerçevesinde sunulmağa çalışılmıştır.

Kuşkusuz, böyle bir yazı kapsamı içinde gelmiş geçmiş bütün reaktör kaza ve arızalarına değinilmesi beklenemez. Bunların ancak en önemilerine değinilebilir. Bunları da genellikle kısaca özetleme zorunluluğu vardır. Ancak, önemi ve ünü nedeniyle TMI olayına derinlemesine inmek gereği doğmuştur. Yalnız bu, "tipik bir örnek" biçiminde algılanmamalıdır. TMI tipik bir örnek değil, şimdiye kadarki en ciddi nükleer santral kazasıdır. Ayrıca, hiç kazaya uğramadan işletmede kalabilmiş örnekler de bilinmektedir. Örneğin ABD' de Massachussets eyaletinde Rowe'daki 185 MW'lık reaktör, 1961 yılından bugüne dek hiç kaza atlatmadan çalışabilmiştir.

Yurdumuzda nükleer santrallerin gündeme geldiği bir dönemde, konuyu sadece kazalarla sınır tutmak, kamuoyunu aydınlatma görevini yerine getirmemek olurdu. Bu nedenle artıklar, üretken reaktörler ve masraflar gibi bazı yan konulara da değinilmiştir.

Yazı, iki ana bölümden oluşmaktadır. Birinci bölüm, TMI olayının ayrıntılı bir incelemesine ayrılmıştır: Olayın kısa bir özetinden önce, buradaki reaktör türü ile ilgili temel bilgiler verilmekte, bunları TMI olayının saniyesi saniyesine gelişmesini anlatan ayrıntılı bir bölüm izlemektedir.

Ayrı bir makale şeklinde hazırlanmış olan ikinci bölüm, dört altbölümden oluşmaktadır. Bunlar sırasıyla TMI öncesi kazaları, TMI'dan sonra süregelen kazaları ve nükleer santrallerde karşılaşılan diğer sorunları incelemektedir. Son alt-bölüm ise değerlendirme ve sonuçlara ayrılmıştır.

Tüm eksikliklerine rağmen yazının, nükleer elektrik santralleri konusundaki güncel tartışmalara, çok olmasa da bir parça ışık tutacağı ve konunun değerlendirilmesine yardımcı olacağı ümit edilmektedir.

#### GİRİŞ

Bugüne dek nükleer enerjiden elektrik elde etme konusunda çeşitli çalışmalar olmuş, çeşitli teknikler ve reaktör türleri geliştirilmiştir. Kanadalılar, doğal uranyum ve ağır su kullanan bir reaktör türü, İngilizler doğal uranyum ve grafit kullanan gaz soğutmalı reaktörler geliştirmişlerdir. Ancak bugün dünyadaki reaktörlerin % 80'i, "hafif su reaktörü" (LWR)\* denilen ve Amerika'da geliştirilmiş olat> reaktör tipidir. LWR'lar da ikiye ayrılır: Kaynar su reaktörleri (BWR) ve basınçlı su reaktörleri (PWR). Amerika'da BWR teknolojisini General Elektrik firması geliştirmiştir. PWR tipi reaktörleri ise Westinghouse, Babcock and Wilcox ve Combustion Engineering şirketleri yapmakta olup, aynı teknoloji Sovyetler Birliği, Fransa (Framatome)

\* İngilizceden yapılan kısaltmalar, ikinci bölümün sonunda açıklanmıştır.

ve Almanya (Siemens-KWU) tarafından da benimsenmiştir. İsveç ise (Asea-Atom) BWR'ı geliştirmiştir. Hafif sulu reaktörlerin özelliği, doğal değil de % 3 oranında zenginleştirilmiş uranyum kullanmalarıdır.

Ancak PWR'ların ilk çıkışına bakacak olursak, bunların başlangıçta nükleer elektrik santralleri için özel olarak tasarlanmadıklarını görürüz. İlk PWR, 1955'te ilk atom denizaltısı olan *Nautilus* için üretilmişti. Amerikalı Amiral Hyman Rickover önderliğindeki reaktör programı, nükleer uçak gemilerinin yapılmasını da kapsamış ve nitekim, Shippingport, Pennsylvania'daki elektrik üreten ilk ABD nükleer santrali, doğrudan doğruya bir uçak gemisi reaktörünün tasarımını devralmıştı. Bundan önce ise Haziran 1954'te Sovyetler, dünyanın ilk nükleer elektrik santrali olan 5 MWe'lik AM-1 santralini Obinsk'te kurmuşlardı. Bu basınç borulu bir reaktördü. Sovyetler, 1964'te Novovoronej'de kurdukları ilk basınçlı su reaktörü ile standartlaşmış basınçlı su reaktörü üretimine geçtiler.

Zenginleştirilmiş Uranyum

PWR'lar, % 3 oranında zenginleştirilmiş uranyum kullanırlar. Doğada uranyum, iki izotop halinde bulunur: U-235 ve U-238. Ancak bu izotoplardan yalnız U-235 fizil'dir (yakıt olarak kullanılabilir), fakat U-235 doğada çok daha fazla bulunan U-238 içinde binde 7 oranında mevcuttur. LWR'lar için bu oranın, zenginleştirme tesislerinde % 3'e çıkartılması gereklidir. Madenlerden çıkarılan uranyum, böyle bir tesise getirilerek burada işlenir. Önce uranyumun doğal biçimi olan U<sub>3</sub>OR, uranyum heksaflorür'e (UF<sub>6</sub>) çevrilir. Sonra, gaz biçiminde olan UF<sub>6</sub>, bir gaz-yayınım (difüzyon) süreci içinde binlerce çok ince zardan geçirilir. U-235, U-238'den % 1 oranında daha hafif olduğu için, bu izotopa sahip moleküller biraz daha hızlı hareket ederler ve sonuçta gaz kütlesi, etkin biçimde ayrıştırılmış olur. Bir gaz yayınım tesisi, binlerce kilometre boyunda borulara sahiptir; 1973 fiyatlarıyla 2 milyar doları olan herkes, bir gaz yayınım tesisi satın alabilir (ABD, SSCB, Çin Halk Cumhuriyeti, Fransa ve İngiltere'de böyle tesisler vardır). Reaktörlerde kullanılan uranyum, askeri amaçlarla kullanılabilecek derecede zenginleştirilmiş değildir. Bu tür uranyumun tesiste çok daha uzun süreli olarak işlenmesi gereklidir ve % 934 oranında zenginleştildiğinde, "silah-ayar uranyum" haline gelir. Doğal uranyum fiyatı 65 dolar/kg (1981 fiyatı) ise, U-235'in fiyatı onbinlerce dolar/kg'ı bulabilir. Santrifüj yoluyla da izotop ayırımı denenmiş, fakat pek başarılı olmamıştır. Son yıllarda laser'le izotop ayırımı geliştirilmeye çalışılmaktadır.

% 3 oranında zenginleştirilmiş uranyum, dönüştürme tesislerinde uranyum oksit'e (UO<sub>2</sub>), ya da metalik uranyuma çevrilir. Genellikle santrallarda, uranyumun oksit biçimi (UO<sub>2</sub>) kullanılır.

Şimdi, 1000 MWV-elektrik, yani 1 Gigawatt (1GWe) üreten bir basınçlı su reaktörünün nasıl çalıştığını inceleyelim.

1 GWe'lik PWR

1000 MW'lık bir basınçlı su reaktörünün kalbi, 3.6 m çapında 3.6 m boyunda silindirik bir bloktur. Bu blok, ince uzun oluklardan oluşur ve bu olukların içine, zirkonyumun bir alaşımı olan Zircaloy-2'den yapılmış yakıt çubukları sokulur. Yakıt çubuklarının her biri 3.6 m boyunda, kurşun kalem kalınlığındadır ve her çubuğun içinde 200 yakıt bilyeciği bulunur. Bir yakıt bilyeciği birkaç milimetre çapındadır, seramik bir matris içinde UO<sub>2</sub> barındırır ve içindeki enerji, 1 ton kömüre ya da 4 varil ham petrole eşittir. Her biri 200 ton kömüre eşdeğer olan yakıt çubuklarından, 1000 MW'lık bir reaktörde yaklaşık 40000 tane vardır.

Ancak, kalpteki olukların hepsine birden yakıt çubuğu sokulmaz. Belli bir geometri çerçevesinde, bor ya da kadmiyumdan yapılmış denetim çubukları da sokulur. Belli bir düzeyde sürekli enerji alınabilmesi için, denetim çubukları gereklidir. Daha da önemlisi, reaktörün kapatılabilmesi ya da söndürülebilmesi için zorunludurlar. Reaktöre "tüyme" emri verildiğinde, denetim çubukları derhal sonuna kadar kalbin içine sokulur bor ve kadmiyum, nötron emici özelliindedir. Nötronların emilmesi, reaksiyonu durdurarak reaktörü söndürür.

1000 MW'lık bir reaktörde 100 ton UO<sub>2</sub> yakıtı vardır. Bu reaktör yılda 30 ton yakıt harcar. Yakıt çubuklarının ömrü 3 yıl kadardır ve yakıtın tazelenebilmesi için, reaktörün genellikle yılda 1 ay kapalı kalması gereklidir. Reaktörün yararlı ömrü 30 yıldır.

Reaktör kalbi, 4 metre çapında, 10-12 metre yüksekliğinde silindirik bir reaktör kazanı içinde barındırılır. Bu kazan, 20-30 cm. kalınlığında çelikten yapılmıştır ve beton bir temele dayalıdır. Ağırlığı 400 tondur. İçinde herhangi bir anda 100 ton civarında su bulunur. PWR'lar başlıca iki tane su çevrimine sahiptir. Bunlardan ilki, "birincil soğutucu çevrimi"dir. Bu çevrimde su, reaktör kazanının bir tarafından girer, kalbin içinde dolaşarak nükleer reaksiyonlardan oluşan ısıyı alır, 250-300°C'ye kadar ısınır ve kazanın diğer tarafından çıkar. Bu su, kalple doğrudan temasta bulunmuş olduğu için radyoaktiftir. 1 metre çapında borularla iki tane "buhar üretici"ne iletilir ve burada "ikincil soğutucu çevrimi" ile ilişkiye girer. Buhar üreticilerinde binlerce incecik boru içinden geçirilen birincil soğutucu, tıpkı bir radyatörün bir odayı ısıtması gibi, sıcaklığını ikincil soğutucu suyuna devrederek onu buharlaştırır. Bu buhar bir türbini, türbin de bir jeneratörü çevirmek suretiyle, elektrik enerjisi elde edilmiş olur.

Burada dikkat edilecek nokta, birincil soğutucunun hiçbir zaman buharlaşmadığı hep su olarak kaldığıdır. Termodinamik nedenlerden ötürü yüksek verim, ancak 100°C'nin üstündeki sıcaklıklarda elde edilebilir. Böyle sıcaklıklar ise ancak suyun yüksek basınç altında, sıvı halde tutulmasıyla mümkündür. Bunların sonucu olarak eğer basınç kazara yitirilecek olursa, bütün soğutucu kısa sürede kaynayıp buharlaşabilir ve reaktör kalbini soğutmasız bırakabilir. Bundan sonra olacaklara da birazdan göreceğimiz gibi, "kalp erimesi" adı verilir. Suyun basınçlı olması hem reaktör tasarımını zorlaştırır, hem de soğutma sistemini karmaşıklaştırır.

Reaktör kazanı, güvenlik nedenleriyle bir koruma binası içine yerleştirilir. Örneğin TMI-2'nin binası 58 m yükseklikte, 43 m genişliktedir. İç yüzeyinde karbon çeliğinden bir zırh, bunun dışında ise 1.2 m kalınlığında beton vardır ve en şiddetli ışımayı bile kesebilir.

Kullanılan teknolojinin arzettiği tehlike nedeniyle, santralin çok dakik olarak inşa edilmesi gereklidir. "Dev bir İsviçre saati" gibi yapılmak zorunda olan böyle bir santralda yüzbinlerce parça, binlerce sayaç, 25 bin kaynaklı 82.5 kilometrelik boru, 1400 kilometrelik elektrik kablosu, 11500 ton inşaat çeliği ve 53 bin m<sup>3</sup> beton vardır.<sup>6-8</sup>

Tehlikeler

PWR da içinde olmak üzere, bir nükleer santralde meydana gelebilecek üç büyük tehlike vardır: 1) Kaza, 2) Sabotaj, 3) Düşman saldırısı.

Kaza olasılığını aşağıda, "kalp erimesi" başlığı altında inceleyeceğiz. Bu, herhangi bir kasit olmaksızın karşılaşılabilecek olan tehlikedir. Bunun yanında, kastlı saldırıları da hesaba katmak gerekmektedir. Ocak 1982'de Fransa'nın Süper-phenix üretken reaktörüne yapılan sabotaj, başarısızlıkla sonuçlandı; çünkü teröristlerin kullandıkları silahlar 1968 öncesine aitti, reaktör ise modern teknolojiye ve güvenlik standartlarına uygun biçimde inşa edilmiş olup, bir uçak düşmesine dayanabilecek tasarımdaydı. Ancak daha iyi düzenlenmiş bir sabotajın etkili olamayacağını kimse söyleyemez.

Haziran 1981'de İsrail'in Irak'taki Temmuz 1 reaktörüne düzenlediği bombardıman, bir reaktöre düşman saldırısının ilk örneğini vermiştir. Ancak İsraililer saldırılarını, reaktöre yapılacak ilk yakıt yüklemesinden birkaç hafta önceye ayarladıkları için, zarar yalnız reaktöre verilenle sınırlı kalmıştır. Kuşkusuz, başka koşullarda zarar çok daha büyük olabilecek, can ve mal kaybına yol açabilecektir.

Üretken olmayan bir reaktörün hiçbir şekilde patlaması söz konusu değildir. Çünkü kullanılan zenginleş-

tirilmiş uranyum, silah ayanı değildir. Ne var ki, kalbin herhangi bir saldırı sonucu açığa çıkması ve bundan yayılacak radyoaktif artıklar, birazdan göreceğimiz gibi büyük yıkıma yol açabilirler.

Bir düşmanın yapabileceği en kötü şey, bir nükleer santrale gene nükleer (ya da termonükleer) olan bir bomba ile saldırmaktır. Böyle bir durumda ortaya çıkacak zarar, tek başına bir reaktör kazasının ya da tek başına bir bombanın verebileceğinden kat kat fazla olur, çünkü reaktör kalbindeki radyoaktif maddeler, çok daha geniş bir alana yayılır. S.A. Fetter ve Kosta Tsipis, bir nükleer reaktörde bir atom (ya da hidrojen) bombası patlamanın bir ülkenin büyük bölümünü yaşanmaz hale getirebileceğini ve böyle bir tek patlamanın, uygun hava ve rüzgar koşullarında Avrupa'nın önemli kısmını yaşanmaz kılaçağını saptamışlardır.<sup>9</sup>

İşıma Birimleri

Bu yazıda değişik ışıma (radyasyon) birimleri cinsinden değerler verilmekte olduğundan, bu birimlere de kısaca değinmekte yarar vardır:

*Küri (Curie: Ci):* 1 gram radyumun radyoaktivitesine eşdeğer olup, saniyede 37 milyar bozunmaya eşittir. İnsan bedeni, tehlikeli izotopların milyonda bir küri miktarından daha fazlasını kaldıramaz. (Bazı izotoplar için bu düzey, 0,1 ve 0.01 mikroküri düzeyine kadar iner).

*Röntgen (R):* Işıma şiddetinin bir ölçüsüdür.

*Rad:* "Emilen röntgen dozu" anlamına gelir ve organik dokuların ışımadan aldıkları enerjiyi gösterir. 1 rad, 100 erg/gr.'a eşittir.

*Rem:* "İnsanda röntgen eşdeğeri" anlamına gelir. Değişik ışıma çeşitlerinin organizmalara verdikleri yıkım farklı farklıdır. Örneğin belli bir röntgendeki X ışınları, aynı şiddetteki  $\alpha$  ışınlarının verdiği kadar organik yıkım yapar. Öte yandan radyoaktif maddelerden her çeşit ışıma yayılmaktadır. Bu nedenle bunların organizma üzerindeki toplam etkisini belirtmek için "rem" birimi kullanılır. 5 rem'in altındaki dozlar genellikle zararsız kabul edilmektedir, ölümcül doz ise 450-600 rem'dir.

Pratikte ve bu yazıda, rad, röntgen ve rem birimleri, kabaca eşdeğer sayılmaktadır.

Kalp Erimesi

Artık, nükleer endüstrisinin korkulu rüyası olan konuya gelebiliriz. Bir reaktörün kalbi, soğutucu kaybı sonucu açıkta kalırsa ne olur?

Herhangi bir kaza olasılığı belirlediğinde, reaktöre hemen "tüyme" emri verilir ve denetim çubuklarının tamamı, sonuna kadar kalbin içine sokulur. Böylece

zincirleme reaksiyon durdurulmuş olur. Uranyum böylelikle zararsız hale getirilmiştir.

Ne var ki sorun, bununla bitmemektedir. Çünkü ana yakıt olan uranyum, nükleer reaksiyon sırasında "yanarken", bir yandan bölünme (fizyon) sonucu oluşan kripton, zenon, stronsiyum ve iyot gibi daha küçük çekirdekli elementlere indirgenir, öte yandan da ışınlanma sonucu, amerisyum, plütonyum ve teknyum türünden daha ağır çekirdekli (uranyum-ötesi: transuranik) elementlere dönüşür. Esas tehlike, işte bu ürünlerdedir. Bunların hepsi son derece radyoaktifler ve etkinlikleri yüz milyonlarca yıla varır. Bölünme ürünlerinden radyoaktif stronsiyum ve iyotun yarı-ömürleri onlarca, diğer bölünme ürünlerinin yarı-ömrü binlerce yıl; plütonyumunki 24 bin yıl, amerisyum ve teknyum gibi uranyum-ötesi ürünlerin yarı ömürleri ise 1-100 milyon yıl arasındadır. Hepsini bir arada ele alındıklarında, bu zaman sürelerinin üstüste binmesiyle etkinlikleri, ancak jeolojik çağlarla ölçülebilecek boyutlara varır. Yani hem kısa, hem orta, hem de uzun dönemde etkindirler, fakat değişik dönemlerde etkinliğin kaynağı farklı farklı elementlerdir. Bunların içinden plütonyum, radyoaktivitesi yetmiyormuş gibi ayrıca dünyanın en toksit maddesidir. Kobra zehirinden daha tehlikelidir; gözle görülmeyen 1 miligramı, ciğerlerde fibrozis yaparak insanı öldürmeğe, 1 mikrogramı bir insanda kemik kanseri yapmağa, greyfrut büyüklüğündeki bir parçası da (toz haline getirilip iyi serpilirse) yeryüzündeki bütün insanları öldürmeğe yeterlidir.

1000 MW'lık bir reaktör kurulduktan bir yıl sonra, kalbinde 10 milyar küri'lik bir radyoaktif madde envanteri oluşmuştur ve bu sayı, ortalama bir reaktör için 15 milyar küri'dir. Bu envanterin uzun ömürlü izotoplara ait bölümü, Hiroşima'ya atılan atom bombası gibi bin tane bombanın doğuracağı ışımadan daha çoktur.

Bütün bunların sonucu olarak, şöyle bir durumla karşılaşırız: 1 GW'lık bir reaktörün kalbindeki jot-131 envanterinin onda biri, bütün Türkiye'ye yerden 10 km yüksekliğe kadar, izin verilen en yüksek dozajın (MPC) iki katı düzeyde kirlitebilir. Ya da stronsiyum-90 envanterinin yarısı, aynı bölgeyi aynı yüksekliğe kadar, MPC'nin 60 katı düzeyinde kirliteğe yeterlidir. 12

İşte kalpteki esas tehlike, bu yanma ürünlerinden gelmektedir. Kalbin erimesi tehlikesi değene bu ürünlerden kaynaklanır. Çünkü denetim çubukları uranyumdaki zincirleme reaksiyonu söndürdüğü halde, yakıt çubuklarındaki uranyum-ötesi (transuranik) ürünlerin spontan bozunmalarını durduramaz. Bu bozunmalar sonucu 1000 MW'lık bir reaktör söndürüldüğünde, içinde 200 MW'lık bozunma ısı kalır. Bu ısı çok ya-

vaş kaybolur ve soğutma devam ettiği takdirde, aylar ya da yıllar sonra normal bir düzeye iner.

Peki, ya soğutma sürdürülemezse, örneğin soğutucu yitirilir ve kalp açıkta kalırsa ne olur?

Ne yazık ki reaktör fiziği ve kimyasının bazı yönleri hakkında bilgisizliğimiz, hâlâ çok yoğundur, öyle ki, farklı bilgisayar yazılım modelleri birbirlerinden tamamen farklı sonuçlar verebilmektedir. Reaktör suyundaki borik asit ile sezyum iodyürün etkileşerek, çok çabuk buharlaşabilen radyoaktif iyot türleri yarattıkları ise daha yeni öğrenilmiş bulunmaktadır.<sup>10</sup>

Ancak önümüzde, kalbin dörtte birinin erimesiyle sonuçlanmış olan TM I gibi bir örnek vardır. Dolayısıyla olacaklar, kabaca bilinmektedir. Soğutma sürdürüldüğü takdirde bozunma ısı denetimsiz ve doğrusal bir biçimde artarak, kalpteki yakıtın hepsini akkor düzeye kadar ısıtır. Yakıt tek bir akkor kütle oluşturacak biçimde ergir ve bu kütle, reaktör kazanının dibine düşer. Erimiş kalbin kazanın dibini eritmesi yarım saat sürer. Kazan aşıldığında altında, böyle bir tehlikeye göre tasarlanmamış beton bir zemin vardır. Kütle, buradan da kolaylıkla geçerek toprağın içinde yoluna devam eder. Dünyanın öbür ucunda Çin'den çıkacağı düşüncesiyle, kalıp erimesi olayına "Çin Sendromu" adı verilmiştir. (TMI olayından iki hafta önce de Jane Fonda'nın başrolünü oynadığı aynı isim ve konulu bir film, Amerika'da gösterilmeye başlanmıştı). Tabii akkor kütle Çin'e kadar gidebilecek değildir; ancak eğer bir yeraltı su kaynağına rastlarsa, binlerce km'yi kaplayabilecek radyoaktif bir buhar sütunu fıskırtabilir. Ayrıca bu olmasa bile, soğutucunun buharlaşması ile radyoaktif maddeler çevreye yayılacaktır. Bu hem BWR, hem de daha az ölçüde PWR'lar için geçerlidir. Eğer koruma binasına zarar gelmezse, bu gazlar gazla zarar vermeyebilirler; fakat koruma binasında bir çatlak, sızıntı ya da patlama olursa, bölgenin 160 kilometre uzaklığa kadar boşaltılması gerekebilir.

Dolayısıyla bir kalp erimesi, 10 bin insanın 10-100 km mesafelere kadar ölümü ve 20 milyar dolarlık mülke zarar gelmesiyle sonuçlanabilir. Olay büyük bir yerleşim merkezi yakınında yer aldığı takdirde hangi önlem alınır alınmaz, birkaç bin kişinin kanserden ölmesi kaçınılmazdır. 1975'te Amerikan hükümeti tarafından yaptırılan resmi bir araştırma, olasılık hesaplarına dayanarak, bir kalp erimesi kazası için şöyle bir bilanço çıkarmıştır: 3300 ölü, 45.000 akut ışıma yaralı, 5000 gizli kanser ölümü, 240 bin tiroid tümörü, kazadan sonraki ilk kuşakta 5000 kalıtsal bozukluk olayı ve toplam 14 milyar dolarlık maddi zarar. Kuşkusuz bu sayıların hiçbiri kesin değildir, fakat bir kalp erimesinin ne demek olduğu hakkında bir fikir vermektedirler.<sup>8-12</sup>

Artık dikkatlerimizi TMI olayına çevirebiliriz.

#### TMI Olayının Özeti<sup>3-4</sup>

Amerika'nın Pennsylvania eyaletinin Harrisburg kentinden 18 kilometre uzaklıkta, Susquehanna Irmağı üzerinde küçük bir ada vardır. Karayolunu izleyerek bu adanın yakınından geçerseniz, üzerinde şimdi terkedilmiş olan bir nükleer santralin soğutma kulelerini görürsünüz. 115 metre yüksekliğindeki bu soğutma kulelerini, Harrisburg'dan da görmek mümkündür. Adanın ismi Üç Mil Adası'dır. (Three Mile Island: TMI). Aynı adı taşıyan santralin ikinci reaktör ünitesi 1979 yılında tarihe geçmiştir.

TMI-2, 1974 yılında tamamlanmış ve o tarihten itibaren sürekli olarak sınanmıştı, 30 Aralık 1978'de devreye sokulmuştu ve kaza meydana geldiğinde, sadece 5 haftadır tam kapasiteyle çalışmaktaydı.

28 Mart 1979 Çarşamba sabahı, TMI-2 %97 kapasiteyle ürettiği 880 MVV'lık elektriği 346.000 müşteriye sağlamakla meşguldü. Saat sabahın dördünde su besleme pompaları devreden çıktılar. Daha önce, 6 Şubat'ta da böyle yapmışlar ve bunun nedeni anlaşılammıştı. Bunun üzerine türbin, normalde olması gerektiği gibi devreden çıktı, fakat reaktörün birincil soğutucu çevrimi normal, çalışma koşullarının (305°C, 151 Newton/cm<sup>2</sup>) üzerine tırmanmağa başladı.

Basınç 165 N/cm<sup>2</sup>'ye ulaştığında, reaktör "tüydü". Aynı zamanda birincil soğutma sistemindeki basınç düşürme vanası da atarak, fazla basıncın azaltılmasını sağladı. Ancak vana, basıncın etkisiyle sıkışmıştı ve operatörler uzaktan kumanda ile "kapama" komutu gönderdikleri zaman kapanmadı. Fakat operatörler bunu öğrenemediler ve vanadan dışarıya, iki saatten fazla bir süreyle birincil soğutucu akmaya devam etti. Basınç düşürme vanasından dakikada 880 litrelik kayıp olduğunu algılayan koruma sistemleri, yüksek basınçlı püskürtme pompalarını çalıştırdılar. Bu pompalar dakikada 4000 litrelik su basabiliyorlardı ve kaybı rahatlıkla karşılayabilecek güçte idiler. Fakat basınç düşürme vanasının sıkıştığının farkında olmayan ve aşırı basınç oluşmasını önlemek isteyen operatörler, kısa bir süre sonra bu pompaları iptal ettiler. Bunun sonucu olarak birincil soğutucu suyu, önce bir su deposuna pompalandı, o taşınca koruma binası dışındaki bir ek binaya aktarıldı. Bu sırada soğutucu kaybı nedeniyle çevrimde kalan soğutucu da aşırı ısınmış bir buhar kütlesi haline geliyordu.

Aynı gün ve ertesi gün, santralden çevreye 32 kilometre uzaklığa kadar radyoaktif buhar yayıldı. Reaktör binası içinde ışıma, 30 000 rem düzeyine erişti, ölümcül doz, 450-600 rem olduğundan, binanın içindeki

ışıma, bir insanı anında öldürmeğe yeterli idi. Yan taraftaki ek binada bile, ana binadan çelik bir zırh ve 1.2 m betonla ayrılmış olduğu halde, bazı yerlerde dozaj, öldürücü dozun iki katı olan 1000 rem'i geçiyordu.

Olayın başlangıcından 3 saat sonra sahada acil durum, bundan yarım saat sonra da genel acil durum ilan edilmiş olmasına karşın, olayın ciddiliği, ancak 30 Mart Cuma günü kamuoyuna yansiyabildi. Oysa kaza, başlangıcından 16 saat sonra atlatılmış bulunuyordu. Valinin de çağrısı ile çevrede yaşayan 650 bin insandan 140 bini, geçici bir süre için evlerini terkederek başka şehirlere gittiler. Bunların en önemli bölümünü, ışımadan kolayca zarar görebilecek hamile kadınlarla çocuklar oluşturuyordu.

1 Nisan Pazar akşamı kriz atlatılmış bulunuyordu. Kalp erimesine yarım saat kala olay engellenmiş, ancak gene de kalbin bir kısmının yıkımı önlenememişti.

Kamuoyunu en çok ürküten konu, olay yerine gelen uzmanların da, nelerin cereyan etmekte olduğunu ve ne yapacaklarını bilememeleriydi. Uzmanlardan birinin deyişiyle, "daha önce eğitimini görmemiş olduğumuz bir durum" ile karşı karşıya kalınmıştı. Uzmanlar özellikle, reaktör kazanının içinde oluşan ve üst kısmına biriken hidrojen gazının patlayacağı ve radyoaktif maddeleri her tarafa yayacağından korkmuşlardı. Ancak sonradan, kazanın içinde oksijen bulunmadığı için böyle bir tehlike olmadığı anlaşıldı.

Şimdi, TMI olayının saniyesi saniyesine gelişmesini inceleyelim.

#### Olayın Gelişmesi<sup>1</sup>

28 Mart 1979 sabahı saat 4'te Three Mile Island'daki (TMI) 2 numaralı reaktör biriminde herşey normal görünüyordu. Reaktör kalbinin (1) (Bkz. Şekil 1) içinden su pompalanıyor, kaynamaması için de yüksek basınç altında tutuluyordu. Buradan iki adet buhar üreticisine (2) geliyor, ısı alışverişini yoluyla ikincil soğutucu sistemindeki su buharlaştırıyor ve bu buhar, türbini (3) çeviriyordu. Isısı düşmüş olan birincil soğutucu, tekrar reaktör kalbine dönüyordu. İkincil soğutucu ise enerjisini türbine bıraktıktan sonra, soğutma kulesi (4) ve yoğunlaştırıcı (5) içinden dolaşan üçüncü bir çevrimdeki çok soğuk su tarafından, tekrar su haline getiriliyordu.

Saat 4'ten önce TMI'da üç tane sorun vardı. İlk sorun, basınç kazanından (6) dışarı bir sızıntı olmasıydı. Bu sızıntı, ya elektromatik basınç düşürme vanasından (7) ya da basınç kazanı güvenlik vanalarından (8) kaynaklanıyordu. Kaçak sıvı, reaktör soğutucu boşaltım sarnıcına (9) birikiyordu. Gerek güvenlik vanalarının,

gerekse basınç düşürme vanasının görevi, isimlerinden de anlaşılacağı gibi, soğutma sisteminde anormal yükseklikte basınçların oluşmasını önlemektir. Yüksek basınçta güvenlik vanaları, reaktör soğutma sisteminin patlamasını önlemek için açarlar. Basınç düşürme vanası ise güvenlik vanalarının istem dışı ve gereksiz açılmalarını önler.

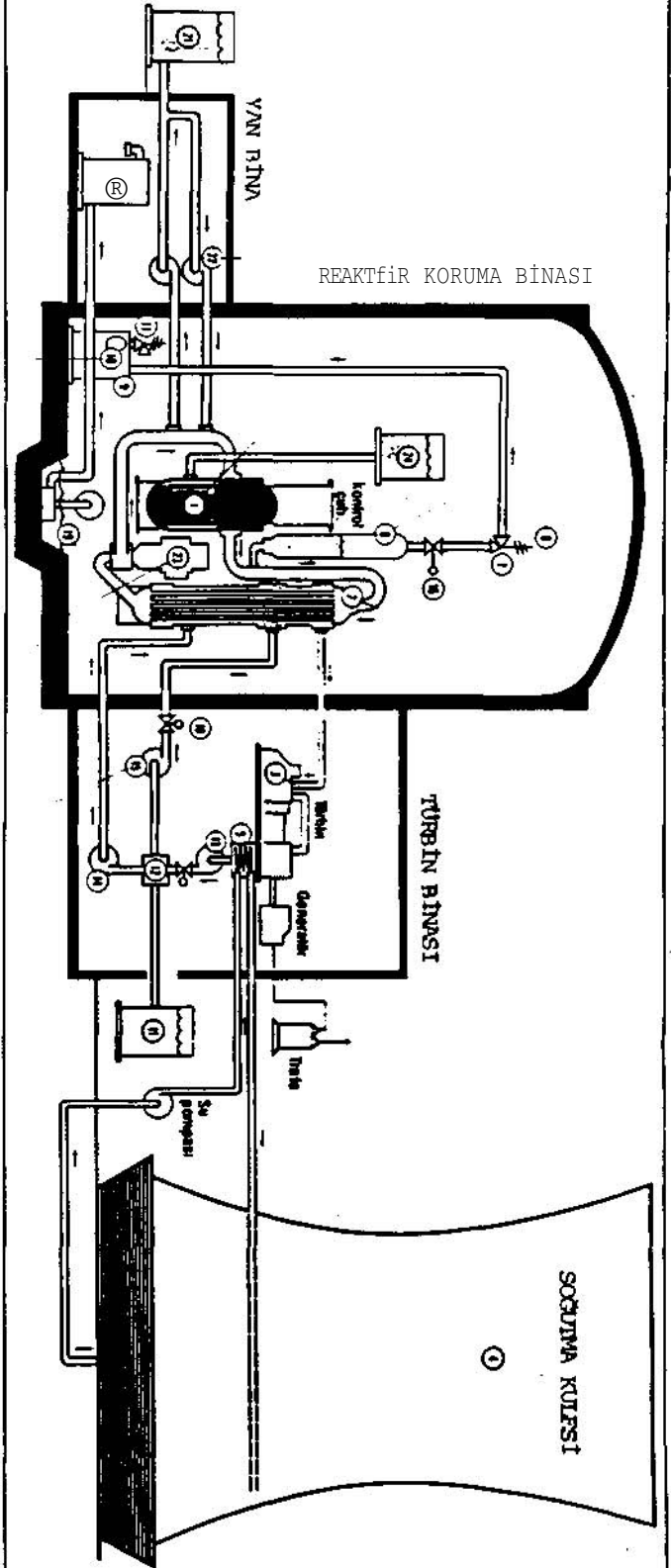
Bu sızıntıya karşın basınç kazanındaki su düzeyi ve reaktör soğutma sistemindeki basınç, operatörler tarafından normal düzeylerde tutuluyordu. Ancak sızıntı, sıcaklık göstergelerinde belirsiz gösterimlere yol açarak, daha sonraki ciddi sızıntının farkedilmesini önledi.

İkinci sorun, blokaj vanalarının (10) kapalı oluşu idi. İki gün önceki normal bakım sırasında vanalar kapalı konumda unutulmuştu. Oysa açık olmaları gerekliydi ve santral operatörlerinin bu durumdan haberleri yoktu.

Üçüncü sorun, operatörler tarafından iyi bilinmekteydi, kazadan onbir saat öncesinden beri bunu çözümlenmeye çalışıyorlardı. Besisuyu (İkincil soğutucu) sistemindeki suyun arı olması gereklidir. Bunun için suda biriken minerallerin, reçineler tarafından süzülüp tutulması gerekir. Kullanılmış reçineler, hava ile çırplarak yeniden kullanılabilir hale gelirler. Mineral giderme işlemi mineral giderici'de (12), reçineyi tekrar kullanılabilir hale getirme de reçine tazeleyici'de (şekilde görülmüyor, fakat mineral gidericiye bağlı) gerçekleştirilir. Ancak mineral gidericiden reçine tazeleme birimine reçine aktarımı sırasında, bir reçine blokajı olmuştu ve giderilmeye çalışılıyordu. Bunun ara sıra olması normaldir ve TMI-2'de de daha önce iki kez olmuştu. Ancak bu kez, reçine blokajı, suyu mineral giderici ile yoğunlaşmış su pompaları (13) arasında bulunan bir tecrit vanasından içeri itti. Bu tersine akış tecrit vanasını kapattı, bu ise yoğunlaşmış su güçlendirme pompalarını tıkararak devreden çıkmalarına neden oldu. Bunun sonucu olarak saat 4'ü tam 36 saniye geçe, biri hariç bütün yoğunlaşmış su pompaları da normal biçimde durdular. Bunun sonucu jeneratörlere giden su tamamen yitirildi ve ana türbin, olması gerektiği gibi hemen devreden çıktı. Böylece TMI'deki kaza, saat 4'ü 37 saniye geçe başladı. Bu kaza aşağıda anlatılanlardan oluşmaktadır.

400:37

0 saniye : Ana besiy suyu ikincil soğutucu pompaları (13) devreden çıkarak, türbinin (3) devredışı olmasına yol açıyor. Üç tane yedek besisuyu pompası (15) normal biçimde çalışmaya başlıyor. Birincil soğutucu, ısısını besisuyuna aktaramadığından, basınç kazanındaki (16) su seviyesi ile birincil soğutucudaki basınç hızla yükselmeye başlıyor.



Şekil 1 (Three Mile Island) Üç Mil Adası  
2 Numaralı Reaktör Biriminin Basit Şekli

/ sn Türbinler duruyor ve 500-kV kesiciler açıyor. Yedek besisuyu pompalarının basıncı yükselmeğe başlıyor. Amaç, yitirilen ana besisuyunu tazelemektir, fakat daha önceden kapalı biçimde unutulmuş olan blokaj vanaları, taze suyun gelmesini önüyor.

3-6 sn. Isınan reaktör soğutucusu genleşerek, basıncı artmasına yol açıyor. Basıncı 158 Newton/cm<sup>2</sup>'ye çıktığında, basıncı düşürme vanası (7) açılıyor. (Vana, 3.7 saat açık kalacaktır.)

8 sn. Reaktörde yüksek basınç oluşması üzerine reaktör, gerektiği gibi otomatik olarak "tüyüyor". Reaktörün 69 denetim çubuğu, 36816 yakıt çubuğu ile çalışan kalbin içine düşerek nükleer reaksiyonu durduruyor ve reaktörü bir saniyede kapatıyorlar. Artık bütün mesele, geride kalan bozunma ısısını gidermektir. İki operatörden biri, bütün denetim çubuklarının dibe geldiğini doğruluyor.

13 sn Açılan vanadan suyun çıkması ile basınç, basıncı düşürme vanasının kapanma ayarına kadar (155 N/cm<sup>2</sup>) düşüyor. Vanayı kapatan denetim düzeneğinin (solenoid) enerjisi kesiliyor ve denetim odasındaki operatörlere, "kapalı" işareti veriyor. Vananın bu sırada kapanmış olması gereklidir, fakat sıkışmış olduğundan 80 kiloluk, 30 bin dolar değerindeki bu vana kapanmıyor.

İşte kaza'nın dönüm noktası, burasıdır. Denetim odasındaki gösterge lambası, vananın gerçekten açık olup olmadığını değil, onu açıp kapayan düzeneğin çalışıp çalışmadığını göstermektedir. Bunun sonucu olarak operatörler, çok sonraya kadar basıncı düşürme (BD) vanasının açık olduğundan habersiz kalıyorlar. Eğer haberleri olmuş olsaydı, basıncı kazanı blokaj vanasını (16) el kumandasıyla kapatarak, soğutucu kaybını ve dolayısıyla, kazayı önleyebilirlerdi. Bunu yapmadıkları için 2 saat 22 dakika süreyle BD vanasından dışarı soğutucu akarak, sonunda kalbi soğutmasız bırakıyor.

14 sn. Yedek besisi pompaları anma basınçlarına erişiyorlar.

15 sn. Basıncı kazanı su düzeyi tepeye ulaşıyor.

38 sn. Birinci buhar üretici (2) su düzeyi, yedek besisi suyu vanalarının açıldığı 75 cm çizgisine ulaşıyor, ancak yedek besisuyu blokaj vanaları kapalı konumda unutulmuş olduğu için besisuyu gelmiyor.

40 sn. İkinci buhar üretici su düzeyi 75 cm'e ulaşıyor, ancak bundaki yedek besisuyu vanaları açılmıyor. Blokaj vanaları kapalı olduğu için zaten su gelmemektedir.

1-4 dakika: Basıncı kazanındaki su düzeyi hızla yükselmektedir. Normalde bu düzeyin artması, soğutma sistemindeki suyun miktarının arttığını gösterir. Ancak soğutma sistemi göstergeleri, basıncı kazanındaki

düzye ile soğutucu kütlesi arasındaki olağan dışı bir ilişki bulunduğunu göstermektedir. 2-3 dakika için soğutma sisteminin dengelenmesi, boşluk oluşmasına işaret etmektedir. Ancak ölçü aletleri, bu dengelenme konusunda operatörlere çelişkili bilgi sunuyorlar. Operatörler, dengelenmeyi gerçek ve sürekli kabul edip durumu kurtardıklarına hükmediyorlar.

Soğutucu basıncı düşmeğe devam ediyor, fakat basıncı kazanındaki su düzeyi yeniden yükselmeğe başlıyor. Bu beklenmedik bir olaydır, çünkü basıncı ve kazanı düzeyi birlikte yükselip alçalmalıdır.

Beklenmedik durum, birincil soğutucu sisteminde ve/veya reaktör kazanında, ani basıncı düşmesinden doğan boşluklardan kaynaklanmaktadır. Bu basıncı düşümünün dört nedeni vardır: 1) Basıncı kazanının enerjisinin önemli bir bölümü, açık kalan BD vanasından yitilmektedir, 2) Reaktörden basıncı kazanına gelen su görelili olarak soğumuştur, 3) Sistemdeki basıncı kaybı nedeniyle basıncı kazanındaki su kaynarak kaybolmaktadır, 4) Isıtıcıları devredışı kaldığından basıncı kazanı geçici bir süre için kendini ısıtamamaktadır.

Reaktör soğutucusu boşaltım sarmıcının (9) basıncı ve sıcaklığı, açık kalan vanadan gelen suyun etkisiyle yükselmeğe başlıyor. Durum denetim odasındaki göstergelerde sergileniyor, ancak operatörler sıcaklık artışını, BD vanasının ilk açılışına yoruyorlar. Boşaltım sarmıcı göstergesi ise, bütün kritik değerlerin sergilediği iki metre boyundaki ana kontrol panolarının arkasında kalan bir panodadır. Eğer operatörler sıcaklık artışının BD vanasının açık kalmasında doğduğunu teşhis edebilseler, ya da basıncı göstergesini görebilselerdi, basıncı kazanı blokaj vanasını (16) açarak doğacak olayları önleyebilirlerdi.

/ dk. 45 sn. Birinci ve ikinci buhar üreteçlerindeki su, tamamen buharlaşmış bulunmaktadır. Artık reaktör ısısı, sadece BD vanasındaki sızıntı ile dışarı taşınmaktadır.

2 dk. 2 sn. Reaktör soğutma sisteminin basıncı, 112 N/cm<sup>2</sup>'ye düşüyor ve buna ayarlı olan yüksek basınçlı püskürtme (YBP) pompalarını harekete geçiriyor.

Her reaktör, birincil soğutucu sisteminde bir arızalanmayı ve kalpte soğutucu kaybını önleyecek şekilde tasarlanmıştır. TMI-2'de hem yüksek, hem de alçak basınçlı birer acil kalp soğutma sistemi (AKSS) vardı. Alçak basınçlıya 7s. 30 dk.'da geleceğiz. Yüksek basınçlı sistem, bir su depolama sarmıcı (21) ile üç tane YBP pompasından (22) oluşuyordu. İsimlerinden de anlaşılacağı gibi bu pompalar, acil soğutucuyu doğrudan doğruya reaktör soğutma sistemine püskürtüyorlardı. Pompalar, görevlerini tam olarak yerine getirdiler ve soğutma sistemine su basmağa başladılar.

Eğer bu pompaların görevlerini yapmalarına izin verilseydi, TMI olayı gene önlenbilirdi.

3 dk. 12 sn. Reaktör soğutucusu boşaltım sarmandaki basınç düşürme vanası, 8,5 N/cm<sup>2</sup>'lik ararı aşıldığından açıyor. Buradan taşan su, koruma binasının dibindeki çukurda (19) birikmeğe başlıyor.

3 dk. 13 sn. Yüksek basınç AKSS'nin normal biçimde çalışmaya başladığını saptayan operatörler, onu el denetimine geçiriyorlar.

3-4 dk. Basınç kazanındaki su seviyesi hızla yükseliyor.

4 dk. civan. Operatörler, olayın kaderini değiştirecek olan ikinci hatalarını yapıyor, acil YBP pompalarından birindeki akışı kısıyor, diğerini ise tamamen kapatıyorlar.

Operatörlerin bunu yapmalarının sebebi, basınç kazanındaki su seviyesinin artmakta oluşu idi. Basınç kazanının üst tarafındaki sıkışmış BD vanasından, önce kazandaki buhar kaçmakta, bunun yerini kalp soğutma sisteminden gelen su doldurmaktaydı ve biraz sonra, 6. dakikada basınç kazanı, tamamen su ile dolacaktı. Reaktör operatörleri arasında buna "dolu kazan" deniyor ve sakıncalı bir durum olarak biliniyordu. Çünkü herhangi bir nedenle oluşabilecek ani bir basınç fırlaması, reaktör soğutma sistemini patlatabilir, soğutucu kaybına yol açabilirdi. Bu ise en istenmeyen durumdur.

Bir soğutucu kaybına yol açmamak için, BD vanasının açık kaldığından habersiz olan operatörler, basılan acil suyu kestiler. Oysa bunu yapmaları, korktuklarına uğramaları ile sonuçlandı. Operatörler farkında değildiler ama, sistem soğutucu ile dolu değildi. Kazanın ilk anlarında soğutucu yokluğu ve bundan doğan aşırı ısınma, soğutucunun buharlaşarak, sistemde boşluklar ya da büyük "kabarıkçıklar" oluşturmasına yol açmıştı. Bu boşluklar, sistemin soğutucu ile dolu olduğu izlenimini yaratıyorlar ve basınç kazanındaki su düzeyini yüksek tutuyorlardı. Oysa bu sırada reaktör soğutma sistemi, doyun, aşırı ısınmış bir buhar kütlesine dönüşmekteydi.

öte yandan operatörler YBP pompalarını kapatmamış olsalar bile, bu iş otomatik denetim sistemi tarafından yapılacaktı. Çünkü bu sistem, basınç kazanı su düzeyi soğutucu sisteminin dolu olduğunu gösterdiğinde, YBP pompalarını durduracak şekilde tasarılmıştı. Böylece aynı hatayı otomatik sistem de yapacaktı.

5 dk. 15 sn. Operatörler, buhar üreticini besleyen besisuyu pompalarını tekrar çalıştırabilmek için, normal yoğunlaşmış su ve besisuyu akışı sağlamaya çalışıyorlar. Bu arada bir operatör, YBP akışını en düşük düzeye kadar kısıyor. Amacı, basınç kazanındaki yükselmenin önüne geçmektir. Gerçekten de pompaların kısılmasıyla kazan düzeyi, 15 saniye için bir düşme gösteriyor.

6 dk. Basınç kazanındaki buhar kabarcığı yitiriliyor. Sistem artık "dolu"dur. Reaktör kazanı boşaltım sarmandaki basınç hızla tırmanmaya başlayarak, buradaki basınç düşürme vanasının üst sınırı olan 10.5 N/cm<sup>2</sup>'ye yaklaşıyor. Basınç kazanının dolu hale gelmesi ile artan soğutucu basıncı, operatörleri dolu bir sistemle karşı karşıya bulduklarına inandırıyor.

7 dk. 29 sn. Çukur (19) ile yan binadaki radyoaktif artık depolama sarnıcı (20) arasında bulunan çukur pompası çalışmaya başlıyor. Çukurdan sarnıca dakikada 560 litre su pompalıyor, fakat bu sarnıcın zarı patlamış olduğundan radyoaktif sular yan binanın zeminine yayılıyor.

8 dk. Operatör, buhar üreticinin "kuru" olduğunun ve blokaj vanalarının kapalı olduğunun farkına varıyor. Bu ana kadar vanaların durumunu belirleyen göstergelerden biri, başka bir vana göstergesinden sarkan bir etiketle kapatılmış durumdadır. Diğer vananın gösterge lambası ise panonun üzerine eğilen operatörün bedeni tarafından gizlenmiş olabilir. Operatör vanaları, uzaktan komuta vererek açıyor. Kurumuş olan buhar üreticine, nisbeten serin su gelmeğe başlıyor. Reaktör soğutucusunun giriş ve çıkış sıcaklığı düşüyor. Soğutucu basıncı da buna bağlı olarak düşüyor.

8 dk.'dan sonra. Buhar üreticilerinde, üreticilere suyun geldiğini gösteren hızlı bir basınç artışı gözleniyor.

8 dk. 30 sn. Reaktörden çıkan soğutucunun sıcaklığı, hızla düşmeğe başlıyor.

10 dk. Reaktör soğutucu sistemi basıncı doyma noktasındadır.

10 dk. 19 sn. Çukurdaki su düzeyi 1.3 m yi geçtiğinde, ikinci çukur pompası çalışmaya başlıyor. Çukur şimdi, 1120 litre/dk. hızla boşaltılmaktadır.

10 dk. 48 sn. 1.4 m düzeyine varıldığında reaktör binası çukur alarmı çalmağa başlıyor. Bundan bir süre sonra çukur, 1.8 düzeyine gelince taşıyor ve radyoaktif su, koruma binası zeminine yayılmağa başlıyor.

10-11 dk. Buhar üreticileri tarafından emilen ısı, reaktör soğutucu çevriminde sıcaklığı düşürdüğünden, basınç kazanı göstergesi normal sınırlar içine girerek hızla düşüyor.

14 dk. Reaktör soğutucu boşaltım sarnıcı zarı (18), 13.5 N/cm<sup>2</sup> basınca erişildiğinde gerektiği gibi patlıyor ve sarnıctaki basınç 36 sn.de 0.7 N/cm<sup>2</sup>'ye düşüyor, Basınç kazanı BD vanası tarafından hâlâ sızdırılmakta olan radyoaktif su, önce sarnıca, sarnıçtan reaktör binası zeminine, buradan çukura birikiyor ve oradan da yan binaya taşıyor. Bu arada sarnıç basıncı, denetim odasında kaydedilmemektedir. Sarnıç parametreleri ana kontrol panosunun ardında gösterilmek-



tedir. Sarnıç alarmlarının çalmakta olduğunu sezebilmek için de operatörlerin, o anda hep birden çalmakta olan ana pano alarmlarının hepsini susturmaları gerekmektedir.

*15-17 dk.* Artık doyum sıcaklığına ulaşılmış bulunmaktadır. Bu demektir ki sistemin herhangi bir yerinde kaynama olabilir ve boşluklar oluşabilir. Reaktör binasında basınç artışı gözleniyor. Artık sistemde kesinlikle boşluklar vardır ve etkileri, reaktör soğutucu pompasından da (23) gözlenmeye başlamıştır. Sistem pompalarından yeterli soğutucu geçmediğini gösteren soğutucu pompası alarmı ile, tam-hız alarmları çalmağa başlıyor, Bu arada akış hızı yavaş yavaş düşmekte, bu da buharlı su pompalandığını göstermektedir. Bu noktadan itibaren belirli zamanlarda düşük-akış alarmları çalmağa devam ediyorlar.

*18 dk.* Artık eksoz göstergeleri, küçük radyoaktif iyot artışları ve reaktör binası eksozu, radyoaktif gaz çıkışında on kat artış gösteriyor. Ancak bu gösterge, arkadaki panonun en dibindedir ve ana pano gerisinde duran bir kimse tarafından görülmesi kolay değildir. Gaz çıkışı da sarnıç vasıtası ile olmaktadır.

*20-60 dk.* Reaktör basıncı, soğutucu sıcaklığı ve basınç kazanı düzeyi değişmiyorlar.

*32 dk. 30 sn.* Kalıp sıcaklığı, gösterge menziline aşıyor.

*36 dk.* Bir tane yedek besisuyu pompası operatör tarafından kapatılıyor.

*38 dk.* Birincisi 31, ikincisi 28 dakikadır çalışmakta olan reaktör binası çukur pompaları, operatör tarafından kapatılıyor. Bu süre boyunca pompalar, yan binaya 33 bin litre su taşımışlardır. Pompaları durdurmak, çıkış borularını tecrit etmiyor ama, görünüşte yan binaya tüm radyoaktif su taşınması duruyor.

Eğer bu aşamada operatörler BD vanasının açık olduğunu bilmiş olsalardı, sorunu çözebilirler miydi? Evet. Blokaj vanasını (16) kapatır, yeniden basınç verir. YBP sistemini son güçte çalıştırır ve reaktör soğutucu pompalarını **işletebilirlerdi**. Bu işlem bütün boşlukları ortadan kaldırırdı, sistemleri de "dolmuş" olmakla birlikte, tehlikede olmazdı.

*50 dk.* Operatörler, artık işlerin ters gitmekte olduğunu farkındadırlar. Resmî amirleri ile işletme mühendisini odaya çağırıyorlar.

*1 saat 11 dk.* Reaktör binası ısınmış olduğundan, ırmaktan alınan su ile soğutulmağa başlıyor.

*/ s. 14 dk.* Reaktör soğutucu çevrimindeki akış, normalin % 60'ına inmiştir. Operatörler endişelenmeye başlıyorlar. Pompaları bu kadar az soğutucuyla çalıştırmak, onları tehlikeye atabilir. Eğer hava sızdırmaz

bir ek yeri tahrip olursa, büyük bir soğutucu kaybı kazasına yol açılmış olabilir. Bu arada reaktör soğutucu pompalarından, artan titreşim belirtileri gelmektedir. Operatörler, dört reaktör soğutucu pompasından ikisini devreden çıkarıyorlar, titreşimler hemen azalıyor. Operatörler, üçüncü büyük hatalarının yarısını gerçekleştirmişlerdir.

*1 s. 27 dk.* İkinci buhar üretici tecrit ediliyor. Reaktör binası basıncında artış gözleyen operatörler, bu üreteçteki basıncın diğerinden 21 N/cm<sup>2</sup> daha düşük olduğunu saptamış bulduklarından, bu üreteçten binaya buhar sızmakta olduğunu sanmaktadırlar. Bina basıncı düşüyor, üreticinin basıncı artıyor, operatörler de üçüncü acil besisuyu vanasını üretece bağlıyorlar.

*1 s. 41.'dan önce* İki soğutucu pompasının kapatılmasından 5-10 dakika sonra, pompa titreşimleri yeniden artmaya başlıyor. Operatörler bunu göstergelerden izleyebildikleri gibi, denetim odasından da hissedebiliyorlar. Çevrim akışı yavaşlamağa devam ettikçe, yeni bir akış dengesizliği belirmiştir.

*1 s. 41 dk.* Operatörler, geri kalan iki soğutucu pompasını da söndürüyorlar ve böylelikle TMI, dönüşü olmayan noktayı aşmış oluyor. Operatörler, üçüncü büyük hatalarını da tamamlamış bulunmaktadırlar.

Bu ana kadar bir kazayı önlemek için yapılabilecek dört şey vardı: 1) Operatörler, blokaj vanasını (16) kapatarak soğutucu kaybına son verebilirlerdi; 2) Yüksek basınç püskürtme pompalarını (22) kısıtlayabilirlerdi; 3) Kısmi olsalar bile, yeniden çalıştırabilirlerdi. 4) Reaktör soğutucu pompalarını durduramayabilirlerdi.

Soğutucu pompaları buhar-su karışımını dolaştırmağa devam ettiği sürece, kalp, aşırı ısınmış olsa bile fazla zarar görmeyecekti. Fakat pompalar kapanınca bütün dolaşım durdu ve bundan sonraki 50 dakikada, kalbin önemli bir bölümü açığa çıktı. Bu ise yakıt çubuklarına zarar verdi ve radyoaktif bölünme ürünlerini dışarı salarak, uzmanları ve kamuoyunu o kadar korkutan hidrojen kabarcığını oluşturdu.

Soğutucu kaybettiklerinin farkında olmayan operatörler, reaktör içinde kaldığını sandıkları soğutucunun doğal dolaşımının (konveksiyon akımları), kalbi soğutmaya yeteceğini ummuşlardı. Ancak pompaları koruma çabaları, umduklarından çok farklı sonuç verdi.

*1 s. 41 dk. sonra.* Operatörler, YBP pompalarını biraz açıyorlar. Soğutucu sistem basıncında artış gözleniyor.

*2 s.* Denetim odası teknik denetçisi ile santral dışındaki birkaç üst düzey yöneticisi arasında telefon konferansı kuruluyor ve 38 dakika sürüyor. Konferansa katılanlar, ortada olağandışı bir şeyler döndüğünün far-

kına varıyorlar, çünkü soğutucu pompaları kapalı olduğu halde basınç kazanında buhar kabarcığı oluşmaktadır. Zar patlaması ve zemindeki radyoaktif su anormal karşılanmıyor, çünkü bunlar daha önce de görülmüştür. Denetim odasında bazı kişiler, blokaj vanasının durumunu sorduklarında kapalı olduğu yanıtını alıyorlar, fakat bu gerçekte kapalı değildir. Konuşmacılar soğutucu pompasını yeniden çalıştırmağa ve denetim odasında toplanmağa karar veriyorlar.

2 s. 28 dk. Operatörlerden biri, blokaj vanasını kapatmak suretiyle basınç düşürme vanasını tecrit ediyor. BD vanasının boru sıcaklığı, diğer vanalarınkinden 20°C daha sıcak olduğu için, bu vananın su sızdırmakta olduğu kabul ediliyor. Blokaj vanasının kapatılmasıyla operatörler, reaktör binasında basınç düşümü gözlüyorlar. Vana kapatılınca soğutma sistemi basıncı 46 N/cm<sup>2</sup>'lik bir minimumdan 91 N/cm<sup>2</sup>'ye tırmanıyor. Bu süre boyunca (üç saate kadar) basınç kazanının düzeyinde değişim görülüyor. Bundan önce soğutucu sisteminden bor örnekleri alınıyor, fakat ışınma düzeyinde bir sorunla karşılaşılıyor. (Bor, nötronları emdiğinden reaksiyon "zehirlevicisi"dir.)

Blokaj vanasını kapatma, kalbi tekrar denetim altına alma yolunda ilk adımdır. Bundan sonra 13 saat boyunca operatörler, dengeli soğutmaya yeniden geçebilmek için çeşitli girişimlerde bulunacaklardır. Ancak sistemde, soğutmaya sağlamaya yetecek kadar soğutucu kalmadığı için, iş işten geçmiştir.

2s. 22 dk. Denetim odasına girmiş olan TMI-1'in operatörü, on dakika içinde BD vanasından sızıntı olduğunu saptayarak, durumu operatörlere bildiriyor.

2s. 29 dk. Kalbin üzerindeki soğutucu buharlaşmaya ve kalp, açılmaya başlıyor. Sıcaklık hızla yükseliyor. Ancak reaktör soğutucusu sıcaklık göstergesi, reaktöre giren ve reaktörden çıkan boruların sıcaklık ortalamasını almaktadır. Bu nedenle aslında 1093°C olan reaktör çıkış sıcaklığı, denetim odasında 300°C (normal) olarak okunuyor. Operatörler bu yüzden, kalbin açılmakta olduğunun farkına varmıyorlar. Sıcaklık göstergesi çok yavaş olarak yükseliyor ve sadece 12 s. 30 dk. çizgisinde, 327°C'lik üst sınırı aşıyor. Oysa 4 ve 5'inci saatler arasında sayısal bir voltmetreyle yapılan ölçümler, sıcaklığın 1371°C'ye yükselmiş olduğunu gösterecektir.

Kalbin açılması, farklı sonuçlar veren iki aşamada oluyor. Birinci aşamada, 100 dakikadan itibaren yakıt çubuklarının "kabuğu"nu oluşturan zirkonyum alaşımı, aşırı ısınmış buhar ile oksitlenerek bozuluyordu. Bu etkisizden ortaya zirkonyum oksit ve hidrojen çıkıyor. Bu hidrojen, reaktör kazanının tepesine yükselerek herkesi korkutan kabarcığı oluşturuyor. Bu kabarcık patlarsa reaktör kazanı yarılabilir, kalp

doğrudan doğruya hava ile temasa geçebilecektir. Ancak reaktör kazanının içinde, böyle bir patlamayı sağlayacak oksijenin bulunmadığı, sonradan anlaşılıyor. Üçüncü saatten itibaren bu hidrojen fazlalığı büyük boyutlara ulaşıyor. Bir kısmı reaktörün tepesinde bir kabarcık olarak kalıyor, bir kısmı soğutucu çevriminde buharla birlikte dolaşarak normale dönüşü zorlaştırıyor, bir kısmı da reaktör koruma binasının havasına geçiriliyor. Birazdan görüleceği gibi, havaya geçen bu hidrojen bir süre sonra oksijenle birleşerek zararsız bir patlama yaratıyor. (Aslında sistemde, normal tasarım gereği az miktarda hidrojen vardır. Bu, soğutucudaki oksijenle birleşip su oluşturmak ve metal yüzeylerin oksitlenerek paslanmasını önlemek amacıyla düşünülmüştür. Ancak kalbin açığa çıkacağı ve sonra olacaklar, bu hesaba katılmış değildir.)

Şimdi kalbin açığa çıkması sürecinde ikinci aşamaya geliyoruz. Yakıt çubuğu kabuklarının bozulmasıyla, çevrimde dönmekte olan buhar-su karışımı, kalpteki radyoaktif bölünme ürünleriyle temasa geçiriyor. Kalpteki 140 milyon kürilik zenon-133'ten 10 milyon kürisi, 100 milyon kürilik iyot-131'in ise ancak 15-24 kürisi atmosfere çıkıyor.

Zenon, iyottan çok daha zararsızdır. Eğer zenonla aynı miktarda iyot açığa çıkmış olsaydı, TMI bir felakete sonuçlanabilecekti. Eğer toplam iyot miktarının % 5'i bile açığa çıkmış olsaydı, 3-350 gecikmeli ölüm ve 200-2700 tiroid tümörü vakası görülecek, 68 bin km<sup>2</sup>'lik bir bölgede süt ve diğer ürünlere karşı tarımsal kısıtlamalar uygulanması gerekecekti. Ancak asal gazlar kimyasal etkileşime girmediklerinden, gerçektekinin 6 katı kadar asal gaz salınmış olsa bile kanser ölümleri 1-25 civarında kalacaktır.

Ortaya fazla iyot çıkmaması, kalpteki yıkımın daha çok kabuklara sınırlı kalmasından ileri geliyordu. Asal gazlar bu etkisizden doğarlar, iyot ise yakıt bilyeciklerinin yıkımıyla ortaya çıkar. Ayrıca iyotun çoğu, su kaçağı içinde eridi. Bu emilmeyi arttırmak üzere suya katılan NaOH'nın da faydası oldu. Bir kısmı ise kömürlü havalandırma filtrelerinde asal gazlardan ayrıldı. Ancak ne su, ne de filtreler, zenon ve diğer asal gazların havaya karışmasını önleyemediler.

2 s. 38 dk. Soğutma sistemindeki bir göstergesi, ışınmada 100 katı bir artış olduğunu belirliyor.

2 s. 54 dk. Operatörler, doğal dolaşımın sağlandığından emin olmadıkları için, bir tane reaktör soğutucu pompasını çalıştırıyorlar.

2 s. 56 dk. Teknisyen, soğutucu borularında radyasyonun 600 Röntgen/saat düzeyinde olduğunu bildiriyor. TMI-2'de saha acil durumu ilan ediliyor.

2 s. 57 dk. Işınma düzeyi tırmanmağa devam ediyor. Bu arada odaya 60 kişi dolmuşdur. Odanın içi ana-baba günüdür ve krizin çözümlenebilmesi için

her kafadan bir ses çıkmaktadır.

3 s. *ten sonra* Basınç kazanı göstergesi, üst sınırını aşmıştır. Operatörler kazanda yeniden bir buhar kabarcığı sağlamağa çalışıyorlar.

3 s. *30 dk.* Genel acil durum ilan ediliyor. Operatörler "birçok" basınç kazanı ısıtıcısının hizmet dışı olduğunu bildiriyorlar.

3 s. *32 dk.* Acil su deposu sarnıcında ısımanın 3 R/s ve yan bina bodrumunda radyoaktivitenin havaya karışmış olduğu bildiriliyor. Göstergelerde ısıma artışları kaydediliyor.

3 s. *40 dk* Koruma binasında basınç 0,28 n/cm<sup>2</sup>'ye çıktığında, yüksek basınçlı püskürtme pompaları otomatik olarak harekete geçiyor, ancak operatörler onları yeniden kapatıyorlar.

4 s. *20 dk.* Koruma kubbesi ısıma göstergesi, 600 R/s kaydediyor.

4 s. *30 dk.* Operatörler, soğutma sistemine yüksek miktarda soğutucu püskürtmek için YBP pompalarını çalıştırıyorlar, fakat artık iş işten geçmiştir.

4 s. *40 dk.* Koruma kubbesi ısıma göstergesi 1000 R/s kaydediyor.

4 s. *46 dk.* Basınç kazanı ısıtıcılarından ikisi devre dışı kalıyor ve kaza'nın sonuna kadar bir daha çalıştırmamıyor. Kazan'ın sadece 10 ısıtıcı grubu çalışmaktadır.

5 s. Koruma kubbesi ısıma göstergesi 6000 R/s'e fırlıyor.

5 s. *35 dk.* Henüz saha dışında ısıma saptanmadığından, bölgenin boşaltılması düşünülüyor.

6 s. *w dk.* Denetim odasındaki ısıma düzeyi, zorunlu personel dışında herkesin burayı boşaltmasını gerektiriyor.

6 s. *17 dk.* TMI -2 personeli, ışımadan korunmak için maske takıyorlar.

6 s. *27 dk.* Zorunlu personel dışında herkes, TMI -Tin denetim odasına geçiyor.

6 s. *52 dk.* TMI-2 denetim odasının kapısı otomatik olarak kapanmıyor. Odadan çıkanlar kapıyı tam kapatmayı ihmal ediyor ve kapalı-devre havalandırma sisteminin koruyuculuğunu tehlikeye düşürüyorlar.

7 s. Denetim odasında maskelerdeki solunum aygıtları, iletişimi engelliyor. Bu anda yan binada ısıma artışı panosunda 10 r/s görülmektedir, suyun akıp gitmesi gereken yerlerde su birikmektedir ve yan bina çukurları dolmuştur. Operatörler, titreşimlerin doğacağı, *bunun sonucu* boruların ek yerlerinin açılacağı ve bir soğutucu kaybı kazasıyla karşılaşacakları korkusu ile, reaktör soğutucu pompasını çalıştırmak istemi-

yorlar. Sistemde buhar kabarcıklarının varlığının farkındadırlar. Reaktör kalbinin suyla örtülü olduğunu zannetmektedirler ve olasılıkları gözden geçirirken, kalbi açıkta bırakmayı da hesaba katmaktadırlar. Personelden bir kısmı, iletişim sağlayabilmek için solunum maskelerini çıkarıyorlar. Daha önce kapatılmış bulunan blokaj vanasını basınç düşürmede kullanma kararı alınıyor.

7 s. *30 dk.* Operatörler bu kez, sistemin basıncını düşürmeğe çalışıyorlar. Bir operatör blokaj vanasını açıyor. Basıncın reaktör binasına açılmasıyla binadaki basınç, 0,014 N/cm<sup>2</sup>'den 0,175 N/cm<sup>2</sup>'ye çıkıyor.

Burada yapmağa çalıştıkları şey, büyük bir soğutucu kaybı kazasını taklit etmektir. Soğutucu sisteminde basınç 28 N/cm<sup>2</sup>'ye kadar düşerse, kalp boca sarnırdaki (24) su kütlesi, bir anda kalbin üzerine boca edilecektir. Bu ise Susquehanna Irmağı'ndan gelen su ile, kalp soğutucusunun sıcaklığını bir ısı alışveriş biriminde giderecek diğer bir soğutma sistemini tetikleyecektir. Ancak bu sistem, radyoaktif sıvıları taşıyacak biçimde yapılmamıştır, pompa eklerinin de yan binaya radyoaktivite sızmasını önleyebileceği kesinlikle bilinmemektedir. Sonuçta operatörler, yeterince düşük basınç elde edemeyeceklerini anlayınca bu projeden vazgeçmek zorunda kalıyorlar.

7 s. *40 dk.* Elektrik şirketi, çevreye radyoaktivite yayılmayacağı şeklindeki görüşünü bildiriyor.

9 s. *50 dk.* Koruma binasında birikmekte olan hidrojen, tutuşarak patlıyor. Binadaki basınç göstergesi 2 N/cm<sup>2</sup>'ye fırlayıp tekrar düşüyor.

7/ s. *50 dk.* Nükleer Düzenleme Komisyonu (NRC) görevlisi, operatöre telefon ederek, reaktör kazanında bir hidrojen kabarcığı bulunabileceğini bildiriyor. Komisyon, aşırı sıcaklık gösteren ölçümlerin doğru olabileceğinden kuşkulananmaktadır, bu takdirde ise kalp açığa çıkmış olabilir. Bu da kalbe su verilmesini gerektirir.

12 s. *10 dk.* Bilgisayar ya da ölçü cihazındaki bir arıza nedeniyle, sıcaklıklar okunamıyor.

12 s. *30 dk.* Şirket, kalpte kabarcık olduğu kanısında değildir. Denetim odasındaki NRC müfettişi, borularda kabarcıklar olduğunu, fakat bunlardan bir tanesinin ortadan kalkmış bulunduğunu bildiriyor. Basınç kazanındaki bir kabarcık kaybolmuştur ve boca sarnıklarından bir miktar su, kalbin üzerine dökülmüştür.

13 s. *30 dk.* Son 5-6 saat boyunca kriz, çözümlenememiştir. Ancak bu uzun süre boyunca sistemdeki düşük basınç, soğutucu sisteminden yeni hidrojen gazı kaçaklarına izin vermiştir. Bu sayede operatörler, ilk başarılarını elde edecek ve reaktör soğutucu pompasının çalışmasını sağlayabileceklerdir. Önce blokaj va-

naşı kapatılıyor, soğutucu sisteminin basıncı artırılıyor ve boşluklar ortadan kaldırılıyor ("kollaps" ediliyor). Kaydediciler basınç artışını doğruluyor, fakat blokaj vanasının kapanıp kapanmadığını bildiremiyorlar. Ancak 13 s. 25 dk.'da, sıcaklıkların normale dönmekte olduğu saptanmıştır. Basınç arttırımından sonra denetim odası personeli, reaktör soğutucu pompasını çalıştırarak çevrimdeki buharı temizlemeyi öneriyorlar.

14 s. 34 dk. Yapımcı firma temsilcisi, firmasına telefon ediyor. Firma görevlileri de basıncın arttırılıp soğutucu pompasının çalıştırılmasından yana olduklarını bildiriyorlar.

14 s. 35 dk. Çevrimde hâlâ kabarcık bulunduğu bildiriliyor.

15 s. 45 dk- Santral yetkilisi, operatörlere reaktör soğutucu pompasını çalıştırmalarını söylüyor.

15 s. 50 dk- Biraz soğutucu dolaşımı sağlanmış olduğundan operatörler, ikinci soğutucu pompasını çalıştırmayı başarıyorlar. Artık bütün sorun, sistemin yavaş yavaş toparlanmasına kalmaktadır.

16 s. Pompalar çalışmaktadır. Soğutucu sıcaklığı 143 °C, basıncı ise 95 N/cm<sup>2</sup>'dir. Basınç kazanı hâlâ doludur, sıcaklığı da 65 °C'dir. Operatörler hidrojen fazlalığını gidermeğe çalışmaktadırlar. Kalp baca sarnıçları açıktır. Operatörler normal soğutma uygulamalarını yerine getirmektedirler.

Saat 20'yi 37 saniye geçmektedir. TMI'daki kaza sona ermiş, olayın soruşturması başlamıştır.

#### Sonraki Gelişmeler

Reaktör binası ve yan bina içinde 4.3 milyon litre radyoaktif su birikmişti. Reaktör binasındaki su, yerdan 3.4 m yüksekliğe kadar çıkıyordu<sup>7</sup>. Bu suyun boşaltılması için uzun ve yorucu çalışmalara girişildi. Suyun içindeki radyoaktif elementleri süzmek için, kimyevi yöntemlerle çalışan dev süzgeçler kullanıldı. Artıklar paslanmaz çelikten kapsüllere konuyor, sudaki radyoaktivitenin 40-50 yıl içinde suyun normal şekilde dökülebileceği düzeye düşeceği hesaplanıyordu. Suyun boşaltılması, 4 yıl sürdü ve ancak 1983 yazında tamamlanabildi. İçeriye özel elbiselerle giren personel, kalbin içine bir televizyon kamerası sarkıttıklarında, kalbin bir bölümünün parçalanmış bir moloz yığını halinde yatmakta olduğunu gördüler. Planlara göre Ağustos 1984'te reaktörün kapağı açılacak, parçalanmış kalp ve geride kalan yakıt çubukları dışarı çıkarılacaktı. Reaktör binası da radyoaktiviteden arındırıldıktan sonra, reaktör ya tamir edilecek, ya da terk edilecekti. Son bilgilere göre en az 2 ton yakıt maddesinin birincil soğutma sistemi içine dağılmış bulunduğu hesabedilmekte, öte yandan reaktör binası zemininde

radyasyon düzeyi, bugün bile saatte 1000 rem'i bulmaktadır<sup>11</sup>.

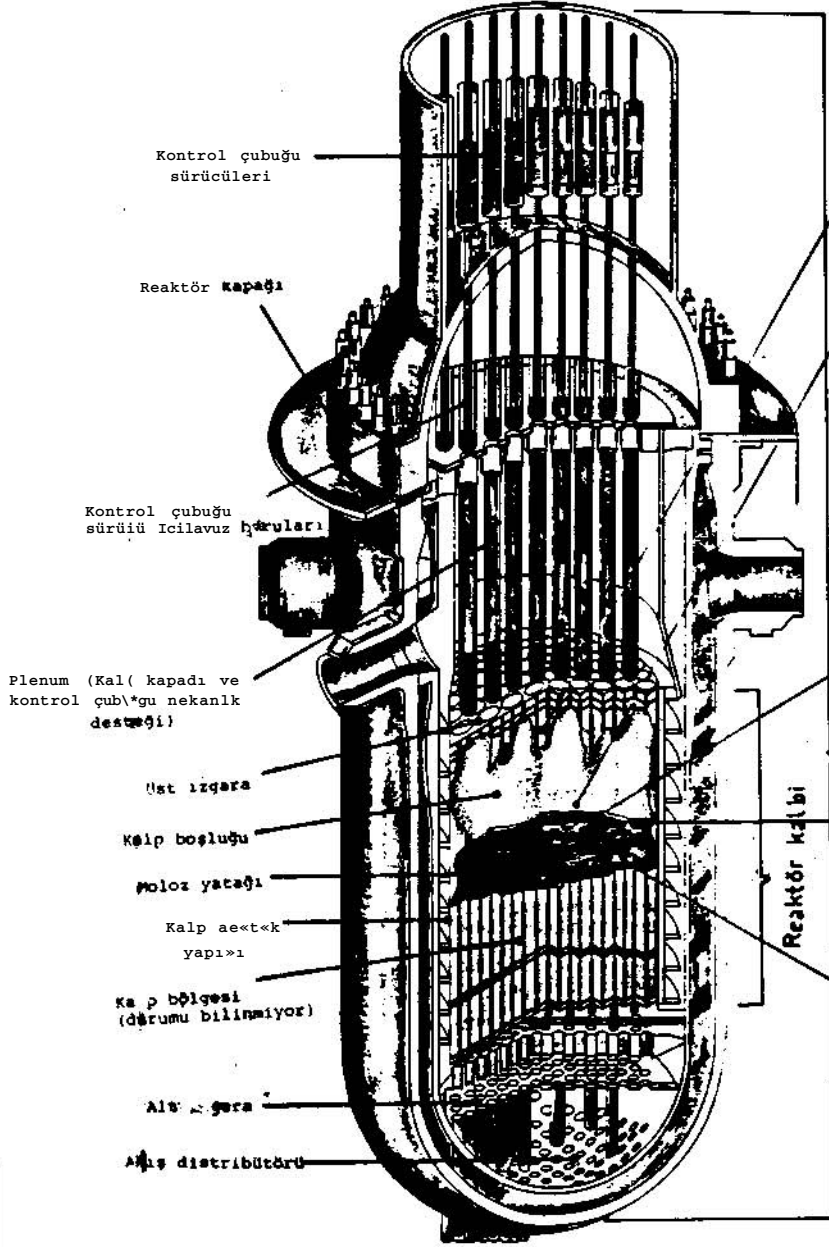
#### Kalbin Durumu

31 Ekim 1983'te yapılan televizyon çekimleri, şimdiye dek elde edilen en açık kalp görüntülerini resimledi (Bkz.Şekil 2). Plenum'da (kalp kapağı) bir vidayı sökerek denetim çubuklarından birinin boşluğuna erişildikten sonra, 38 mm çapındaki bu delikten aşağı 12.2 m'lik bir kablo ile kapalı devre bir televizyon kamerası sarkıtıldı. Kalpte açılmış olan boşluğun zemininde yatan erimiş Zircaloy, moloz yatağının altında yeniden katlanmış bir kütlenin bulunabileceğini gösteriyordu, öte yandan Zircaloy'un erimesi ve uranyum bilyecikleri ile birlikte ısınmış olması, bu bilyeciklerin normalde 2804 °C olan erime sıcaklıklarını da düşürmüş ve erimelerine yol açmış olabilir.

Ses-öteki radar (sonar) kullanılarak kalp boşluğunun üç-boyutlu bir haritası çıkarıldı. Boşluk, 34 m<sup>3</sup>lük kalbin üst yarısında 93 m<sup>3</sup>lük bir hacim oluşturuyordu. Böylece kalbin %27.3'ünün, ya da ağırlık olarak 8-16 ton yakıtın yerinde olmadığı anlaşılıyordu, öte yandan bazı yakıt çubuğu demetleri, kopmamış durumda bu boşluğun içine sarkmaktaydı. Boşluğun altında kalan kalp bölümünün durumu ise henüz kesinlik kazanmış değildi.

Dönen bir boru ucuna takılmış midye kabuğu biçiminde bir tutma kısmından oluşan 14 metre uzunluğunda bir aygıtla, boşluğun dibindeki moloz yatağından örnekler alındı. 1 mm-2 cm boyutlarında olan maden parçaları, daha çok yakıttan ve biraz da Zircaloy'dan oluşmaktadır. Molozların taşıması görünümü, aşırı ısınmış kalbe yeniden su eklendiğinde ani soğutma sonucu yakıt çubuklarının parçalandığı görüşünü destekler niteliktedir.

Denetim çubuğu sürücü mekanizmasından sökülen 5.6 metre uzunluğundaki paslanmaz çelik vida üzerinde yapılan incelemeler, ışımadan arıtma işlemlerinin sanılandan daha zor olacağını gösterdi. Vidanın yüzeyinde ışıma düzeyi, saatte 30-60 Röntgen idi ve daha çok sezyum-137'den kaynaklanıyordu. Vidanın boratlı su ve başka 6 eriyik ile yıkanması, sonuç vermedi; vidayı arıtmakta ancak nitrik hidroflorik asit etkili olabilirdi. Oysa sezyum, normalde suda kolaylıkla eriyordu, öte yandan bu asitin çok toksik ve pahalı olması, geniş çapta kullanılmasını önüyor, paslanmaz çelikten yapılmış reaktör parçalarının nasıl arıtılacağı henüz tam olarak bilinmiyordu. Ayrıca sezyum-137'nin %90'ı vida yüzeyinin altına işlemiş olduğundan, vida yüzeyindeki stronsiyum-90'ın %85'ini ve uranyum oksitinin %90'ını arıtmakta başarılı oldukları halde, mekanik ovma ve yıkama işlemlerinin iç işleyen sezyumu arıtmakta yetersiz kalacağı anlaşılması oluyordu<sup>11</sup>.



A Plenum'un altındaki yakıt çubukları



B Boşluktaki parçalanmış yakıt çubukları



C Moloz yataının televizyon görüntüsü



D Kalp boşluğunun Sonar'la elde edilmiş topografisi



E Moloz yataından alınmış parçaların görünümü

Şekil 2 (TM1) üç Mil Adasında Reaktör Kalbinde Oluşan Boşluk ve Diğer Ayrıntılar.

## Alınan Dersler

*önceki Olaylar.* Başka santrallerdeki benzer olaylar tarandığında görüldü ki, elektromatik basınç düşürme vanası, her 50 çalışmadan birinde sıkışmaktadır ve 1970'ten beri bu vanalardan 11 tanesi, başka santrallerde açık konumda sıkışmıştır. Ayrıca benzer olaylar, daha önce de yaşanmıştır: 1974 yılında TMI'nin 1 numaralı biriminde aynı olaylar 2-3 kez olmuş, ancak sarnıçlar taşmamıştı. TMI olayının adeta bir provası, 24 Eylül 1977'de Ohio'da Davis-Besse, 20 Mart 1978'de de California'da Rancho Seco reaktörlerinde yaşanmıştır. Ancak her iki reaktör de olaylar sırasında bakımda olup %3 kapasitede çalıştıklarından önemli sonuçlar doğmamıştı. Rancho Seco'da olaylar bir operatörün denetim panosu içine kazara küçük bir ampul düşürerek denetim sisteminde kısa-devre yaratmasıyla başlamıştı. Davis-Besse'de de hem vana sıkışmış, hem de operatörler YBP pompalarını engellemişlerdi. Fakat reaktör düşük güçte çalışıyordu ve sıkışık vana 20 dakikada keşfedildi. 1978-79 yıllarında bir NRC saha müfettişiyle TVA'da çalışan bir nükleer mühendisin bu konulardaki uyarılarına kulak asan olmamıştı<sup>8</sup>. Son olarak TMI-2'nin kendisinde de, olaydan neredeyse tam bir yıl önce, 29 Mart 1978'de BD vanası açık konumda sıkışmıştı. Bu önceki olayların değerlendirilmemiş olması, bütün reaktörlerdeki deneyimlerden her reaktörün yararlandırılması gereğini ortaya koydu. Ancak bugün bile, bu konudaki girişimlerin yeterli olmadığını savunanlar vardır.

Almanlar, BD vana sıkışmasını kalp erimesinin en olası üç nedeninden biri olarak gördükleri için, 1977 yılında bütün Alman reaktörlerinde bu vana için teknik bir çözüm getirmişlerdi<sup>9</sup>.

*Kalpteki Su Düzeyi.* Olaya dıştan bakan bir gözlemci için en akıl almaz nokta, bugüne kadar reaktörlerde, kalbi örten suyun düzeyini açık seçik gösteren bir ölçü aygıtının bulunmamasıdır. Reaktörler için en büyük tehlike olan kalp erimesi soğutucunun yitirilmesinden doğduğu halde, bırakınız böyle bir aygıtı, en önemli 'kaza parametrelerini kaydeden göstergeler bile TMI'de denetim odasının çeşitli yerlerine serpiştirilmişti ve kalitesiz bir gösterim sunuyorlardı. TMI'den önce bütün ders ve başvuru kitapları, basınç kazanındaki düzey ölçümü her durum için yeterli olacağından, kalp soğutucu düzeyini ölçmeğe gerek olmadığını açıkça belirtmişlerdi<sup>13</sup>.

Bu tür bir ölçü aleti, ancak yeni yeni geliştirilmeğe başlanmıştır. Fakat bu işi,-reaktör kazanından sıcaklık ölçümü yapıp, basınç konusundaki bilgilerle birleştirecek ve doyum eğrisini çizecek basit bir mikroişlemci ile de yapmak mümkündür. Kuşkusuz bundan sonraki her çeşit uygulamada kalp su düzeyi göstergesi, bir zorunluluk haline gelmiş bulunmaktadır.

*İnsan Mühendisliği.* TMI'nin denetim odası, belki bir kaza'nın önlenmesi için gerekli bilgileri veriyordu, fakat bu bilgilerin gösterim ve sunulduğu, operatörlerin işlerini kolaylaştıracak yerde, akıllarını daha da karıştıracak biçimdeydi. Birbiriyle ilintili kritik parametreler, birbirinden kopuk ve ilgisiz yerlerde gösteriliyordu. Denetim odası tasarımına ergonomik açıdan bakma ve makina/insan iletişimini en verimli şekilde sağlama gereği, TMI'de çok açık bir biçimde ortaya çıktı.

*Operatör Hatası.* TMI konusundaki tüm incelemeler, operatör hatası olmaksızın kaza'nın önlenmesini mümkün olacağı konusunda birleşmişlerdir. Öyle ki, eğer sistemler otomatik olarak çalışmalarını sürdürmüş olsalar ve operatör müdahalesi olmamış olsa, belki de hiçbir terslik çıkmayacaktı.

Çeşitli araştırmalar, nükleer santral kazalarının önemli bir bölümüne insanların yaptıkları hataların yol açacağını ortaya koymuştur. 1979'da Almanya'da yapılan bir araştırma, kazalarda insan hatası payını %66 olarak belirlemiş, başka araştırmalar da buna yakın sonuçlar vermiştir.

TMI'nin operatörleri, ABD'nin en iyi operatörleri arasında idiler. Ancak genellikle santral operatörleri, lise mezunu kimseler oluyor, askerlikleri sırasında Deniz Kuvvetleri'nde reaktör deneyimleri olup olmadığına bakılıyordu. Operatörlerin eğitimi sırasında da, nükleer santrallerin işleyişi ve bozulabilme şekilleri, yani işin özü üzerinde değil, daha önceden geliştirilmiş bazı kaza senaryolarında alınacak önlemler üzerinde duruluyordu. Operatörler, bir nükleer santralin nasıl çalıştığını doğru dürüst anlamıyorlar ve kitapta yer almayan bir kaza zinciri karşısında kalınca ne yapacaklarını şaşırıyorlardı. Hem operatörlerin daha iyi eğitilmesi, hem de daha bilgili bir yönetici denetiminde bulunmaları gereği ortaya çıktı. Operatörlerin genellikle olaysız ve tekdüze geçen çalışma yaşamları da kazaların doğmasında bir etkeni, fakat bunun nasıl çözümleneceği açık değildi.

*Halk Sağlığı.* Bir reaktör kazası halinde çevre halkının sağlığının korunması için en güvenli yol, bölgenin boşaltılmasıdır. Ancak TMI olayından sonra yapılan çalışmalar, büyük kentlerin düzenli bir şekilde bir haftadan önce boşaltılamayacağını ortaya koydu. İyot-131'in olumsuz etkilerine karşı daha etkili bir önlem olarak, halka potasyum iyodür dağıtılması konusu gündeme geldi.

Bilindiği gibi iyot-131, normal iyot gibi insan bedninde tiroid bezine giderek yerleşir ve burada tümör oluşumuna yol açar. Potasyum iyodür (KI), iyot için etkili bir blokaj maddesi olduğundan, iyot-131'in yerleşimini de önler ve böylece bu izotopun olumsuz etkileri büyük ölçüde azaltılmış olur. Bugün nükleer

santrallarda çevre halkına önceden potasyum iyodür tabletleri dağıtmak yaygın bir uygulama olmamakla beraber, ABD'de TVA şirketinin çalışma bölgesi olan Tennessee eyaletinde, santrallerden 8 km uzaklığa kadar, İsveç'te ise 12 km uzaklığa kadar oturmakta olan bölge sakinlerine bu tabletlerden dağıtılmıştır.

**Denetim Sorunu.** "Barış için Atom" programı ile birlikte 1950'li yıllarda kurulan ABD Atom Enerjisi Komisyonu, hem reaktör güvenliğini sağlamak, hem de nükleer santrallerin propagandasını yapmak gibi, çelişkili iki görev yüklenmişti. 1975 yılında bu komisyon ikiye bölündü ve güvenlik konusunu Nükleer Düzenleme Komisyonu (NRC) üstlendi. Ancak bu komisyonda da atasının kalıtsal özellikleri, varlıklarını sürdürdüler. Genellikle NRC, reaktör yapımcılarının güvenlik standartlarını yeterli görüyor, buna karşılık yapımcılar da NRC için yeterli olanın ötesinde güvenlik önlemi alma gereğini duymuyorlardı. TMI'den sonra NRC'nin tutumunda büyük değişiklikler oldu. Denetimlerini ve ihmaller için kestiği cezaları arttırmaya başladı, yeni güvenlik önlemleri getirdi. Ancak bu kez şirketler, bu önlemlerin, her türlü etkileşime açık olan reaktör sistemlerinde ters teptiğini, getirilen kısıtlamaların güvenliği arttıracakları yerde, azalttığını savunmaya başladılar ve riziko analizi yapılmasını istediler. Bir nükleer elektrik santralının yalnız o santralden ibaret olmadığı, coğrafi konumunun, fiziksel yapısının ve işletme personelinin dışında yönetsel ve bürokratik mekanizmaların da bir kazada rol oynayabilecekleri, böylelikle anlaşılması oldu.

#### Olayın Bilançosu

TMI-2'nin kuruluş maliyeti, 780 milyon dolardı. Kaza ile ilgili tüm resmi masrafların 900 milyon doları aşması beklenmektedir<sup>3</sup>. Olayda can kaybı olmadı, ancak bölge sakinleri geçirdikleri korku ile kaldılar.

TMI'nın nükleer endüstri üzerindeki etkisi, hem olumlu, hem de olumsuz oldu. Bir taraftan firmalar güvenlik önlemlerini arttırdılar ve daha uyanık davranmaya başladılar, fakat öte yandan kamuoyunun nükleer enerjiye güveni, büyük bir darbe yedi. Nükleer karşıtı gruplar için TMI, bir demirbaş malzeme haline geldi. Nükleer endüstri, henüz içinden çıkamamış olduğu bir bunalıma sürüklendi. Pek çok santral siparişi iptal edildi. ABD'de, (42'si kuruluş aşamasında olan) nükleer santrallerin temsil ettiği 160 milyar dolarlık yatırımın büyümesi ümitleri suya düştü. Dünyanın diğer ülkelerinde ise TMI'nin etkileri, nispeten daha hafif bir şekilde geçirildi.

#### Sonuç

TM l'den hemen sonra bütün reaktör operatörleri, orada meydana gelen kazayı önleyecek biçimde eğitildiler. Ancak bu eğitim ve alınan bütün önlemler, yalnız-

ca TMI'deki olay zincirini kapsıyordu. Gelecekte olabilecek kazalar farklı biçimde gelişebilir, çok farklı önlemlerin alınmasını gerektirebilirdi. Örneğin yedek besisuyunun 8 dakika süreyle yitirilmesi, kazayı fazla etkilememişti. Fakat başka kaza senaryolarında yedek besisuyu, kalp erimesini önlemekte kritik bir rol oynayabilirdi.

Bu yetmiyormuş gibi, bütün santraller için genelde geçerli olacak bir uygulama geliştirmek de olanaksız görünüyordu. Bir reaktördeki boruların ortalama 3.2 km'lik bir kısmında sızıntı olabilir. Buhar üreticindeki ince boruların yarıması da apayrı bir sorun oluşturur. Temel reaktör tasarımına, sızıntının yerine ve bir santral, kalp erimesini engellemek için farklı bir önlemler demeti gerektirecektir. Bazı durumlarda YBP pompalarının söndürülmesi gerekebilir. Başka hallerde, ilk bakışta yapılacak en iyi şey BD vanasını kapatmak olarak görüldüğü halde, doğru işlem, aşırı basıncı önlemek için onu açmaktır. Bu ve benzeri nedenlerden ötürü, TMI sonrasında alınmış olan önlemler, benzer ya da daha kötü bir kaza'nın önlenmesini garanti etmeğe yetmemektedir. Sonuç ne olursa olsun, görülebildiği kadarıyla nükleer santraller varolduğu sürece, 1979'da TMI'de olanlar akıllardan silinmeyecektir.

#### KAYNAKLAR

##### Yararlanılan kaynaklardan başlıcalan şunlardır:

1. IEEE Spectrum, Kasım 1979, TMI özel Sayısı, s.30-111, özellikle s. 32-42.
2. IEEE Spectrum, Nisan 1981, "TMI-2" özel Raporu, s. 28-44.
3. Time, 9 Nisan 1979, s. 8-18; 13 Şubat 1984, s. 15.
4. Newsweek, 9 Nisan 1979, s. 8-23.
5. Jack Edwards, "Lessons from Three Mile Island", New Scientist, 13 Ocak 1983, s. 79-84.
6. Harold W. Lewis, "The Safety of Fission Reactors", Scientific American, Mart 1980, s. 33-45.
7. John C. De Vine, "A Progress Report on Cleaning up TMI", IEEE Spectrum, Mart 1981, s. 44-9.
8. Daniel Ford, "Three Mile Island". New Yorker, 6 Nisan 1981, s. 49-120; tbid. 13 Nisan 1981, s. 46-109. (Ford, Three Mile Island: Thirty Minutes to Meltdown, Baltimore: Penguin, 1983).
9. S. A. Fetter, Kosta Tsipis, "Catastrophic Releases of Radioactivity", Sci. Am., Nisan 1981, s. 33-40.
10. New Scientist. 24 Mayıs 1979, s. 9.
11. IEEE Spectrum, Nisan 1984, "TMI+5" özel Raporu, s. 26-55.
12. Amory B. Lovins, "World Energy Strategies, Pt. I", Bulletin of the Atomic Scientists, Mayıs 1974, s. 28.
13. Frigyes Reisch, "Meeting the need for an unambiguous PWR coolant level measurement", Nuclear Energy International, Ocak 1984, s. 34-38.