

Bölüm II

Büyük Nükleer  
Kazalar ve Nükleer  
Enerji Teknolojisinin  
Evriminde Doğurdukları  
Sonuçlar



Prof. Dr. Hasan Saygın

## Yönetici Özeti

52

Nükleer felaket, insanları fiziksel, zihinsel, duygusal ve ekonomik hasar vererek ayrıca da gelecek nesiller üzerinde ciddi etkilere yol açacak biçimde genetik olarak derinden etkileyen bir afettir. Üç Mil Adası kazası (1979), Çernobil faciası (1986) ve şimdi de Fukuşima I nükleer kazası (2011) nükleer enerjinin gelişimini ve reaktör teknolojisinin evrimini güçlü bir biçimde etkilemiştir. Dünyadaki ilk ciddi kaza ve bugüne kadar Batı ülkelerindeki en kötü nükleer kaza, 1979'da Üç Mil Adasındaki tesiste bulunan basınçlı su reaktöründe gerçekleşmiştir.

Bu kaza, INES seviye 5 olarak ölçeklendirilmiştir. Üç Mil Adası kazası nükleer enerjinin küresel gelişiminde önemli bir dönüm noktasıydı. 1963-1979 arasındaki dönemde yapım aşamasındaki reaktörlerin sayısı her yıl sürekli artmaktaydı. Kaza sonrasında, ABD'de yapım aşamasındaki reaktörlerin sayısı hızla düşmüştür. 1980-1984 arasında toplam 51 Amerikan nükleer reaktörü iptal edilmiştir. Küresel olarak, nükleer enerji santrallerindeki artış, 1986 yılında çok daha yıkıcı olan Çernobil felaketi ile durmuştur. Çernobil kazası tüm dünyada nükleer enerji sektörü açısından bir dönüm noktasıydı. Dünya Nükleer İşletmeciler Birliğine göre (WANO); "Bu kaza nükleer enerjinin yeterince güvenli olmadığını açıkça göstermiştir. Kaza, nükleer enerji hakkında öylesine olumsuz bir yargının oluşmasına neden olmuştur ki, bu nitelikte bir kazanın tekrarlanması halinde nükleer enerjinin bütün dünyadaki mevcudiyeti hatta geleceği tehlikeye girecektir."

1979'daki Üç Mil Adası ve 1986'daki Çernobil kazalarını izleyen onlarca yıllık durgunluk sonrasında, iklim değişikliği ve enerji bağımlılığına ilişkin ciddi endişeler nedeniyle nükleer enerji yeniden gündeme girmiş bulunmaktaydı. Sektör son yıllarda yeniden canlanmaya çalışıyordu. Fukuşima kazası tam da bu esnada ve sektör temsilcilerinin enerjiye aç bir dünyada nükleer enerjinin büyük çapta yayılmasını kaçınılmaz hale geldiğini ileri sürdükleri bir aşamada gerçekleşmiştir. Bu kaza, Çernobil'den bu yana, belki de tarihte yaşananların en kötüsü olarak nitelendirilmektedir.

Dünyadan meydana gelen çeşitli nükleer kazalar sonrasında, gerek kamu otoriteleri gerek santral üreticileri bu kazalardan ders çıkararak, nükleer enerjinin daha güvenli bir enerji kaynağı haline gelmesine katkıda bulunmuşlardır. Nitekim 1980'lerin başından bu yana nükleer enerji kullanan birçok ülke, nükleer güvenliği düzenleyerek denetim altına almıştır. Sektör, kendinden güvenli olarak adlandırılan reaktörlerin geliştirilmesi üzerinde çalışmaktadır. Gelişmiş (Nesil III ve III+) reaktörler, bu dönemde geliştirilmiştir. Akkuyu santrali için öngörülen VVER 1200 tipi reaktörleri de içeren bu yeni nesil reaktörler, daha güvenli ve daha fazla yakıt tasarruflu olup sermaye maliyetini düşüren daha basit bir tasarıma haizdir.

# 1 Giriş

Nükleer felaket, insanları fiziksel, zihinsel, duygusal ve ekonomik hasar vererek ayrıca da gelecek nesiller üzerinde ciddi etkilere yol açacak biçimde genetik olarak derinden etkileyen bir afettir. Üç Mil Adası kazası (Three Mile Island) (1979), Çernobil faciası (1986) ve şimdi de Fukushima I nükleer kazası (2011) nükleer enerjinin gelişimini ve reaktör teknolojisinin evrimini güçlü bir biçimde etkilemiştir (IAEA 2009).

Dünyadaki ilk ciddi kaza ve bugüne kadar Batı ülkelerindeki en kötü nükleer kaza, 1979'da Üç Mil Adasındaki tesiste bulunan basınçlı su reaktöründe gerçekleşmiştir (Teeghman). Bu kaza, INES seviye 5 olarak ölçeklendirilmiştir. Üç Mil Adası kazası nükleer enerjinin küresel gelişiminde önemli bir dönüm noktasıydı. 1963-1979 arasındaki dönemde yapım aşamasındaki reaktörlerin sayısı her yıl sürekli artmaktaydı. Kaza sonrasında, ABD'de yapım aşamasındaki reaktörlerin sayısı hızla düşmüştür. 1980-1984 arasında toplam 51 Amerikan nükleer reaktörü iptal edilmiştir. Küresel olarak, nükleer enerji santrallerindeki artış, 1986 yılında çok daha yıkıcı olan Çernobil felaketi ile durmuştur. Çernobil kazası tüm dünyada nükleer enerji sektörü açısından bir dönüm noktasıydı. Dünya Nükleer İşletmeciler Birliğine göre (WANO); "Bu kaza nükleer enerjinin yeterince güvenli olmadığını açıkça göstermiştir. Kaza, nükleer enerji hakkında öylesine olumsuz bir yargının oluşmasına neden olmuştur ki, bu nitelikte bir kazanın tekrarlanması halinde nükleer enerjinin bütün dünyadaki mevcudiyeti hatta geleceği tehlikeye girecektir."<sup>1</sup>

1980'lerin başından bu yana nükleer enerji kullanan birçok ülke, nükleer güvenliği düzenleyerek denetim altına almıştır. Sektör, kendinden güvenli olarak adlandırılan reaktörlerin geliştirilmesi üzerinde çalışmaktadır. Gelişmiş (Nesil III ve III+) reaktörler, bu dönemde geliştirilmiştir. Daha yeni reaktörler, daha güvenli ve daha fazla yakıt tasarrufu özelliklerine sahip olup sermaye maliyetini düşüren daha basit bir tasarımı haizdir.

1979'daki Üç Mil Adası ve 1986'daki Çernobil kazalarını izleyen onlarca yıllık durgunluk sonrasında, iklim değişikliği ve enerji bağımlılığına ilişkin ciddi endişeler nedeniyle nükleer enerji yeniden gündeme girmiş bulunmaktaydı. Sektör son yıllarda yeniden canlanmaya çalışıyordu. Fukushima kazası tam da bu esnada ve sektör temsilcilerinin enerjiye aç bir dünyada nükleer enerjinin büyük çapta yayılmasını kaçınılmaz hale geldiğini ileri sürdükleri bir aşamada gerçekleşmiştir. Bu kaza, Çernobil'den bu yana, belki de tarihte yaşananların en kötüsü olarak nitelendirilmektedir. Japonya'da Fukushima'daki reaktörlerin tasarımcıları, bir deprem tarafından yaratılan tsunaminin, deprem sonrası reaktörü stabilize etmesi beklenen yedek sistemi etkisiz hale getireceğini öngörmediler.

Nükleer enerji sektörü, reaktör güvenliği ve performansını iyileştirdi ve daha güvenli (fakat genellikle test edilmemiş) yeni reaktör tasarımlarını oluşturdu. Ancak, reaktörlerin doğru biçimde tasarlanacağı, inşa edileceği ve çalıştırılacağına dair hiçbir garanti bulunmamaktadır. Kaza, Üç Mil Adası ve Çernobil kazaları gibi, nükleer reaktör teknolojisindeki ciddi sorunların varlığını bir kez daha ortaya koydu.<sup>2</sup>

1- <http://clonemaster.homestead.com/files/cancel.htm>

2- "Nükleer Enerjinin 50 Yılı", IAEA. [http://www.iaea.org/About/Policy/GC/GC48/Documents/gc48inf-4\\_ftn3.pdf](http://www.iaea.org/About/Policy/GC/GC48/Documents/gc48inf-4_ftn3.pdf).

Bu kazaların ardından tüm nükleer tesisler, kendi reaktör tasarımlarını ve operasyonlarını, deneyimler ışığında ne gibi değişiklikler yapılması gerektiğini belirlemek üzere gözden geçirdiler.

Bu çalışmada, dünyadaki büyük nükleer reaktör kazaları ve nükleer teknolojinin evrimi açısından etkileri incelenmektedir.

## 2 Dünyadaki En Büyük Nükleer Kazalar

Uluslararası Atom Enerjisi Kurumu (IAEA), nükleer ve radyasyon kazasını / felaketini “herhangi bir biçimde ve sebeple kazayla veya planlı gerçekleşmiş olmasından bağımsız olarak bireyler üzerinde öldürücü etkiler, çevreye büyük radyoaktif salımı veya reaktör çekirdeğinin erimesini kapsayacak biçimde insanlar, çevre veya tesis üzerinde önemli sonuçlar doğuran bir olay” olarak tanımlamaktadır.

IAEA, etkilerini esas almak suretiyle nükleer kazaların şiddetini belirlemede Uluslararası Nükleer ve Radyolojik Olay Ölçeğini (INES) kullanmaktadır. Bu skala nükleer kaza durumunda güvenliğe ilişkin önem bilgilerinin hızla iletilebilmesi için oluşturulmuştur. Ölçek logaritmiktir ve her artan seviye, bir önceki seviyede yer alandan yaklaşık on kat daha şiddetli bir kazayı temsil etmektedir (IEAE 2009).

Şekil 1: INES ölçeğinde nükleer olayların hiyerarşisi



**Seviye 7**, planlı ve uzun süreli karşı önlemlerin uygulanmasını gerektiren geniş alana yayılmış sağlık ve çevresel etkileri olan büyük miktarda radyoaktif madde salımı ile tanımlanan büyük kazaları temsil eder. Büyük kaza, radyolojik açıdan atmosfere onbinlerce terabequerel üzerindeki seviyelerde I-131 salımı ile eşdeğer radyoaktivitede çevresel bir salımla sonuçlanan olaydır. Bu, tipik olarak kısa ve uzun ömürlü radyonükleidlerin bir karışımını içeren bir güç reaktörünün çekirdek mevcudunun büyük bir kısmına tekabül etmektedir. Böyle bir salımda, belki birden fazla ülkeyi kapsayan geniş bir alanda stokastik (rastlantısal) sağlık etkileri beklenir ve belirleyici (deterministik) sağlık etkileri olasılığı bulunur. Uzun dönemli çevresel etkiler de olasıdır ve bireyler üzerindeki sağlık etkilerini önlemek veya sınırlamak üzere korunak veya tahliye gibi koruyucu tedbirler alınmasının gerekli olarak değerlendirilmesi son derece muhtemeldir. Şimdiye kadar iki adet seviye 7 kaza gerçekleşmiştir: Çernobil ve Fukuşima kazaları (IAEA 2009).

**Seviye 6**, planlanmış karşı önlemlerin uygulanmasını gerektirmesi muhtemel önemli miktarda radyoaktif madde salımın yol açtığı insanlar ve çevre üzerindeki etki ile tanımlanan önemli kazayı temsil eder. Ciddi kaza, radyolojik açıdan atmosfere binlerce ila onbinlerce terabequerel seviyelerde I-131 salımı ile eşdeğer radyoaktivitede çevresel bir salımla sonuçlanan olaydır. Böyle bir salımda, bireyler üzerindeki sağlık etkilerini önlemek veya sınırlamak üzere korunak veya tahliye gibi koruyucu tedbirler alınmasının gerekli olarak değerlendirilmesi son derece muhtemeldir. Şimdiye kadar sadece bir kaza bu eviyede sınıflandırılmıştır: Kyshtym (Mayak) Kazası (IAEA 2009).

**Seviye 5**, geniş sonuçları olan kazaları temsil etmektedir. İnsanlar ve çevre üzerindeki etkileri, planlanmış karşı önlemlerin bir kısmının muhtemelen uygulanmasını gerektirecek sınırlı miktarda radyoaktif madde salımı ve radyasyon nedeniyle münferit ölümler şeklinde tanımlanır. Radyolojik bariyerler ve kontroller üzerindeki etkisi, reaktör çekirdeğinde ciddi hasar ve buna bağlı olarak, muhtemel bir büyük kritiklik kazası veya yangın nedeniyle halkı etkileme olasılığı yüksek olan, büyük miktarda radyoaktif madde salımı (IAEA 2009).

Geniş sonuçları olan kaza, radyolojik açıdan atmosfere yüzlerce ila binlerce tera becquerel seviyelerde I-131 salımı ile eşdeğer radyoaktivitede çevresel bir salımla sonuçlanan olaydır. Windscale yangını (İngiltere - 1957) ve Üç Mil Adası kazası (ABD - 1979), nükleer enerji santrali kazaları arasında seviye 5 kapsamındadır (IAEA 2009).

Tablo 1: INES ölçeği

INES Uluslararası Nükleer ve Radyolojik Olay Ölçeği			
INES Seviyelerinin Genel Tanımı			
INES Seviyesi	Halk ve Çevre	Radyolojik Bariyerler ve Kontrol	Derinliğine Savunma
Büyük Kaza Seviye 7	<ul style="list-style-type: none"> <li>Planlı ve uzun süreli karşı önlemlerin uygulanmasını gerektiren geniş alana yayılmış sağlık ve çevresel etkileri olan büyük miktarda radyoaktif madde salımı</li> </ul>		
Ciddi Kaza Seviye 6	<ul style="list-style-type: none"> <li>Planlanmış karşı önlemlerin uygulanmasını gerektirmesi muhtemel önemli miktarda radyoaktif madde salımı</li> </ul>		
Geniş Sonuçları Olan Kaza Seviye 5	<ul style="list-style-type: none"> <li>Planlanmış karşı önlemlerin bir kısmının uygulanmasını gerektirmesi muhtemel sınırlı miktarda radyoaktif madde salımı</li> <li>Radyasyon sebebiyle münferit ölümler</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reaktör çekirdeğinde ciddi hasar meydana gelmesi</li> <li>Tesis içerisinde halkı etkileme olasılığı yüksek olan, büyük miktarda radyoaktif madde salımı. Büyük bir kritiklik kazası ya da yangın bu tür bir olaya sebep olabilir</li> </ul>	
Yerel Sonuçları Olan Kaza Seviye 4	<ul style="list-style-type: none"> <li>Yerel besin kontrolünden başka bir karşı önlem uygulanması beklenmeyen az miktarda radyoaktif madde salımı</li> <li>Radyasyon sebebiyle en az bir ölümün gerçekleşmesi</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Yakıt erimesi veya yakıt hasarı sonucu çekirdek mevcudunun %0,1'inden fazlasının salımı</li> <li>Tesis içerisinde halkı önemli oranda etkileme olasılığı olan, önemli miktarda radyoaktif madde salımı</li> </ul>	
Ciddi Olay Seviye 3	<ul style="list-style-type: none"> <li>Çalışanlar için izin verilen yıllık doz miktarının on katını aşan radyasyona maruz kalma</li> <li>Radyasyon kaynaklı ölümcül olmayan deterministik sağlık etkileri (yanık gibi)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Bir çalışma alanında 1 Sv/saat'in üzerinde doz hızına maruz kalma</li> <li>Bir alanda, tasarımda beklenmeyen şekilde, halkın etkilenme olasılığı düşük olan ciddi kontaminasyon olması</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Bir nükleer tesiste alınacak güvenlik önleminin kalmadığı, kazaya yakın durum</li> <li>Kayıp ya da çalınmış yüksek aktiviteli, zırhlı radyasyon kaynağı</li> <li>Gönderildiği adrese ulaşmamış, bulunduğu yerde kaynağı idare etmek için yeterli prosedürlerin olmadığı, yüksek aktiviteli zırhlı radyasyon kaynağı</li> </ul>
Olay Seviye 2	<ul style="list-style-type: none"> <li>Halktan bir bireyin 10 mSv'in üzerinde radyasyon dozuna maruz kalması</li> <li>Bir çalışanın yıllık izin verilen miktarın üzerinde radyasyon dozu alması</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Bir çalışma alanında doz hızının 50 mSv/saat'in üzerinde olması</li> <li>Tesis içinde, tasarımda öngörülmemiş bir alanda önemli bir kontaminasyon olması</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Güvenlik önlemlerinde gerçek bir sonuca yol açmayan önemli aksaklıklar oluşması</li> <li>Güvenlik önlemleri hasar görmemiş, yüksek aktivitedeki kayıp kaynak, cihaz ya da taşıma paketi bulunması</li> <li>Yüksek aktiviteli radyasyon kaynağının uygun olmayan şekilde paketlenmesi</li> </ul>
Anomali Seviye 1			<ul style="list-style-type: none"> <li>Halktan birinin yıllık izin verilenin üzerinde radyasyon dozu alması.</li> <li>Derinliğine savunmanın önemli miktarda hasar görmediği, güvenlik bileşenlerindeki küçük problemler</li> <li>Düşük aktiviteli kaynak, cihaz ya da taşıma paketinin kaybolması veya çalınması</li> </ul>
Güvenlik Açısından Önemsiz (Ölçeğin Altında / Seviye 0)			

**Tablo 2:** INES ölçeğindeki derecelerine göre nükleer olaylar

	Halk ve Çevre	Radyolojik Bariyerler ve Kontrol	Derinliğine Savunma
7	Çernobil, 1986 – Geniş alana yayılmış sağlık ve çevre etkileri. Reaktör çekirdeği mevcudunun büyük bir kısmının dışarıya salımı		
6	Kyshtym, Rusya, 1957 – Yüksek aktiflikteki atık tankının patlaması sonucu önemli miktarda radyoaktif maddenin çevreye salımı		
5	Windscale Atom Reaktörü, İngiltere, 1957 - Reaktör çekirdeğindeki yangın sonrası radyoaktif maddenin çevreye salımı	Üç Mil Adası, ABD, 1979 – Reaktör çekirdeğinde şiddetli hasar	
4	Tokaimura, Japonya, 1999 – Nükleer tesisteki ciddi olay sonrası işçilerin ölümcül dozlara maruz kalması	Saint Laurent des Eaux, Fransa, 1980 –Reaktördeki yakıt kanallarından birisinin bölgede salıma yol açmadan erimesi	
3	Örnek mevcut değil	Sellafield, İngiltere, 2005 – Tesis içinde sınırlandırılan büyük miktarda radyoaktif madde salımı	Vandellos, İspanya, 1989 – Yangın nedeniyle oluşan ve nükleer enerji santrali güvenlik sistemlerinin kaybıyla neticelenen kazaya yakın olay
2	Atucha, Arjantin 2005 –Bir güç reaktöründe bir işçinin yıllık miktarı aşan miktarda aşırı doza maruz olması	Cadarache, Fransa, 1993 – Kontaminasyonun tasarımda öngörülmeleyen bir alana yayılması	Forsmark, İsveç, 2006 – Nükleer enerji santrali acil durum güç kaynağındaki genel arızalara ilişkin güvenlik fonksiyonlarının bozulması
1			Nükleer tesisteki çalışma limitlerinin ihlal edilmesi

**Seviye 4**, yerel sonuçları olan kazaları temsil etmektedir. Yerel sonuçları olan kaza, radyolojik açıdan atmosfere onlarca ila yüzlerce tera becquerel seviyelerde I-131 salımı ile eşdeğer radyoaktivitede çevresel bir salımla sonuçlanan olaydır. Seviye 4 kazaları, Japonya'daki Tokaimura Kazası ile Fransa'daki Saint Laurent des Eaux Kazasıdır (IAEA 2009).

INES ölçeğindeki en büyük beş nükleer kaza, aşağıda verilmiştir:

- **Çernobil Kazası (Seviye 7)**

Ukrayna'nın kuzeyinde Çernobil Nükleer Enerji Santralindeki kaza, nükleer enerjinin barışçıl kullanım tarihindeki en büyük kazadır. Reaktörde, buhar patlaması ve yangının neden olduğunu erime ile çok büyük miktarlarda radyoaktif madde salımı yaşanmıştır. Patlama, 4 numaralı reaktör koruma binasında gerçekleşti ve radyoaktif maddenin havaya yayılmasına yol açacak biçimde binanın çatısını uçurdu. Bu kaza neticesinde reaktörün dördüncü ünitesi tamamen tahrip oldu. Reaktör çekirdeği mevcudunun büyük kısmının salındığı ve kontaminasyona yol açtığı yerler Beyaz Rusya (Belarus), Ukrayna ve Rusya Federasyonuydu. Patlamalar sonrasındaki 10 gün esnasında reaktörün aktif



çekirdeğinden etrafa yayılan radyonükleidlerin toplam aktivitesi yaklaşık olarak 1019 Bq olarak tayin edilmiştir. Geniş bir alanayayılmış sağlık ve çevresel etkiler mevcuttu. Çernobil Nükleer Enerji Santralinden kaynaklanan radyasyon, enerji santralindeki ve çevresindeki ve hatta Avrupa'nın birçok kısmındaki çok sayıda insanı etkiledi. Sonuçta Çernobil şehri (nüfus; 14.000) büyük oranda, daha büyük bir şehir olan Pripyat (nüfus; 49.400) tamamen terk edildi ve 30 km'lik bir yasak bölge oluşturuldu (IAEA 2009; Teeghman; Malko).

#### • Fukuşima Nükleer Kazaları (Seviye 7)

Kaza, 11 Mart 2011 tarihinde başlayan bir dizi olay neticesinde gerçekleşti. 2011 Tōhoku depremi ve tsunamisinin neden olduğu yedek güç ve muhafaza sistemlerindeki büyük hasar, Fukuşima I nükleer tesisi reaktörlerinin bazılarında aşırı ısınma ve kaçaklara yol açtı. Reaktörlerin her birindeki kaza ayrı ayrı derecelendirildi; üç tanesi seviye 5, bir tanesi seviye 3 ve durumun bütünü ise seviye 7 olarak derecelendirildi. Santral etrafında 20 km'lik bir yasak bölge ve 30 km'lik gönüllü bir tahliye bölgesi oluşturuldu (IAEA 2009; Teeghman).

#### • Kyshtym Kazası (Seviye 6)

Sovyetler Birliği Mayak'ta 29 Eylül 1957 tarihinde gerçekleşti. Bir askeri nükleer atık işleme tesisindeki soğutma sistemi hasarı, 70-80 ton yüksek radyoaktivitede maddenin çevreye salınmasına yol açan bir buhar patlamasına sebep oldu. Yerel nüfus üzerindeki etkisi tam olarak bilinmiyor. Bu kaza, Çernobil ve Fukuşima'dan sonra gelen ve seviye 5'in üzerine çıkan tek kazadır (IAEA 2009).

#### • Üç Mil Adası kazası (Seviye 5)

Kaza, 28 Mart 1979 tarihinde Middletown, Pensilvanya (Amerika Birleşik Devletleri) yakınındaki Üç Mil Adası Ünite 2 (TMI-2) Nükleer Enerji Santralinde gerçekleşti. Tasarım ve operatör hatalarının birleşimi, soğutucunun kademeli olarak kaybına ve kısmi erimeye neden oldu. Radyoaktif gazlar atmosfere salındı. Santral çalışanları veya yakındaki kişiler arasında hiçbir ölüme yol açmamış olmakla beraber bu, ABD'nin ticari nükleer enerji santralleri işletme tarihindeki en ciddi kazaydı (IAEA 2009; Teeghman).

#### • Windscale yangını (Seviye 5)

Kaza, 10 Ekim 1957 tarihinde İngiltere'de gerçekleşti. Askeri bir hava soğutmalı reaktördeki grafit yavaşlatıcının (moderatör) tavllanması, grafit ve metalik uranyum yakıtın yanmasına yol açarak, radyoaktif reaktör maddesinin toz halinde çevreye salınmasına neden oldu (IAEA 2009; Teeghman).

Bu kazaların ardından tüm nükleer tesisler, kendi reaktör tasarımlarını ve operasyonlarını, deneyimler ışığında ne gibi değişiklikler yapılması gerektiğini belirlemek üzere gözden geçirdiler. 1979'daki TMI-2 Kazasından bu yana, şiddetli kaza fenomeninin anlaşılması ve nükleer enerji santrallerindeki şiddetli kaza (ŞK) fenomeni bünyesinde bulunan çok sayıda belirsizliği azaltmak üzere önemli miktarda araştırmalar yapıldı (USNRC, 1980). Reaktör tasarımındaki başlıca amaç,

reaktörün belirlenen güvenlik limitlerini aşmadan gerçekleşeceği kabul edilen çok çeşitli olaylara karşı dayanabilmesini sağlamaktır. Farazi olarak birincil devredeki soğutucu kaybı kazasının (LOCA) sonuçlarının tayin edilmesi, kabul kriterlerini karşılamaında esas unsurdur.

Yukarıda dünyadaki en büyük beş nükleer kazadan bahsedilmiş olsa da burada sadece, bu çalışmanın amacı bağlamında, sivil olanlar detaylı bir biçimde değerlendirilecektir. Söz konusu kazalar, sivil nükleer enerji üretiminin 50 yıllık tarihinde en büyükleri olan Çernobil, Fukuşima ve Üç Mil Adası kazalarıdır.

## 3 Üç Mil Adası Kazası ve Nükleer Enerji Teknolojisi Üzerindeki Sonuçları

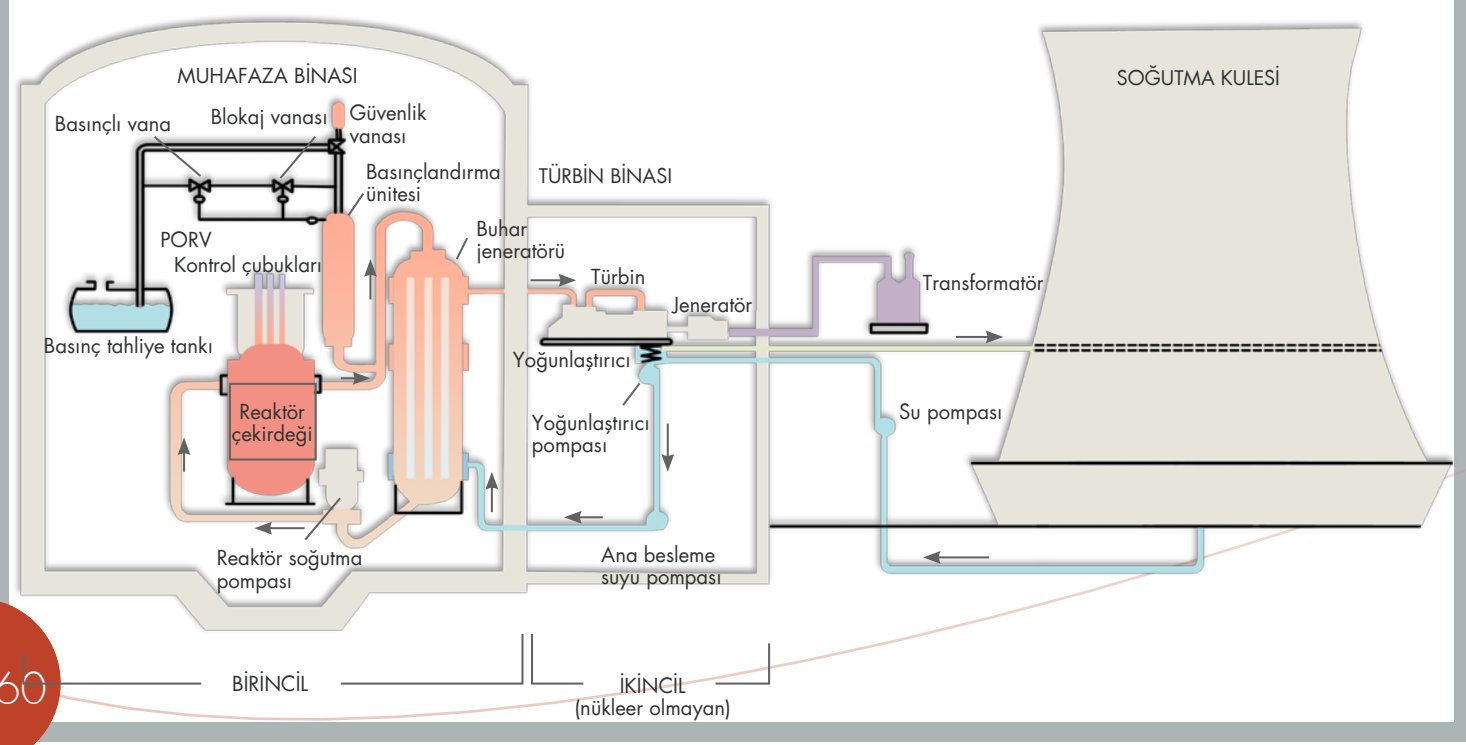
### 3.1 Üç Mil Adası Reaktörü –Genel Özellikleri

Üç Mil Adası Ünite 2 (TMI-2), Akron'daki First Energy şirketinin sahibi olduğu ve 1979'da bir teknoloji kazası sonucu hasar gören ve bir daha hiç açılmayan testistir.

Şekil 2: Üç Mil Adası Nükleer Enerji Santrali



Şekil 3: Üç Mil Adası Nükleer Enerji Santrali şematik gösterimi



TMI-2, Babcock ve Wilcox tarafından tasarlanmış, 2.720 MWt ısı güce sahip bir basınçlı su reaktörüdür (PWR) (Henry 2007). PWR, yüksek sıcaklık işleminin verimi ile reaktör çekirdeğini sürekli devir daim edilen su ile dolu yüksek basınçlı bir tank içine yerleştirmek suretiyle kapalı bir sistemin güvenliğini bir araya getirir. Su, yaklaşık 150 atmosferlik yüksek basınca maruz kaldığından, su sıcaklığı, kaynama olmaksızın 300 °C üzerine çıkabilir. Reaktör soğutucu pompaları, ısınmış bu suyun buhar jeneratörlerinde devir daim edilmesini sağlarlar. Burada ısı, ikincil sistemde çok daha düşük basınçla devir daim olan soğuk suya aktarılır. İkincil sistemdeki ısınmış su, düşük basınçlı buhara dönüşür ve elektrik jeneratörlerini çalıştıran türbinleri çalıştırır. Kapalı reaktör sisteminde üretilen büyük miktardaki ısı sadece ikincil sistemde buhar oluşumu vasıtasıyla bertaraf edilebilir.

Reaktör çekirdeğindeki suyun kaynamasına asla izin verilmezken, sadece basınç tankındaki suyun kaynamasına izin verilir. Kapalı birincil sistemde devir daim olan su burada buhara dönüştürülür. Basınç tankının üst kısmında her zaman basınçlı buhar vardır; bu bölgeyi genişletmek veya daraltmak suretiyle (elektrikli ısıtıcılar veya su spreylere ile) operatörler aynı zamanda reaktör basıncını kontrol ederler.

TMI-2 reaktör haznesi, çevresini ve üzerini kuşatan beton bir korunaktan ibaret bir reaktör muhafazasına sahiptir. Muhafaza veya reaktör binası, yaklaşık 2 milyon fit küp (56640 metre küp) hacme sahip çelik astarlı silindirik beton bir yapıdır. Bu bina, en az 55 psi basınç muhafaza etmek üzere tasarlanmıştır.

## 3.2 TMI-2 Kazası: Olaylar Dizisi

Üç Mil Adası Kazası, Ünite 2’de gerçekleşen kısmi bir çekirdek erimesiydi. 28 Mart 1979 tarihinde kazadan önceki saatlerde TMI-2 reaktörü, eşi olan TMI-1 reaktörü yakıt ikmali için kapatılmışken %97’lik tam güçle çalışmaktaydı. Çekirdek erimesine yol açan olaylar zinciri gece yarısından sonra saat 4’te başladı<sup>3</sup>:

- Basınçlı su reaktörünün üç ana su/buhar devresinden birisi olan TMI-2’nin ikincil devresinde, halen daha bilinmeyen bir nedenle tutucuları besleyen pompalar durmuşken çalışanlar, sekiz tutucudan (ikincil devre suyunu temizleyen gelişmiş filtreler) birisindeki tıkanıklığı temizliyordular.
- Bir baypas vanası açılmayınca su, kapalı olan ikincil sistem ana besleme suyu pompalarına akmamaya başladı.
- Su akışı kesildiğinden reaktör çekirdeğindeki sıcaklık yükseldi. Bu durum, reaktör içindeki suyun genleşmesine, basınçlandırma ünitesindeki basıncın normalden 100 psi daha yüksek olan 2200 psi değerine çıkmasına neden oldu. Bu da, reaktörün otomatik olarak durmasına neden oldu.
- Nükleer zincir reaksiyonunu durdurmak üzere sekiz saniye içinde kontrol çubukları çekirdeğe batırıldı. Ancak, radyoaktif çekirdeği bölünebilir ürünler ısı üretmeye devam ettiler, dolayısıyla sıcaklık ve basınç artmaya başladı. Basıncı düşürmek için pilot kumandalı tahliye vanası (PORV) olarak adlandırılan basınçlandırma ünitesindeki vana açıldı. O ana kadar her şey, tasarımdaki gibi çalıştı.

Bunun ardından olağandışı bir olaylar dizisi başladı:

- PORV vanasının, öngörüldüğü şekilde basınç belli bir seviyenin altına düştükten yaklaşık 10 saniye sonra kapanması gerekirdi. Ancak kapanmadı. Kaza artık oluşum aşamasındaydı.
- Operatörler, tahliye vanasının kapandığını düşündüler çünkü cihazlar, vanaya “kapa” sinyalinin gittiğini gösteriyordu. Gerçekte PORV açık pozisyonda takılı kalmıştı. Ne yazık ki operatörlerin elinde vananın fiili pozisyonunu gösteren bir cihaz yoktu.
- Vana açık haldeyken buhar ve su basınçlandırma ünitesinden kaçtı; bu su, bir tahliye tankında birikti. (Bu, bir Soğutucu Kaybı Kazasını ifade ediyor.)
- Soğutma suyu kaybına cevaben acil durum besleme pompası, suyun türbine akmaya devam etmesi için Acil Durum Püskürtme Suyu (EIW) sitemine su basmak üzere otomatik olarak aktif hale geçmeliydi. Pompa, reaktöre dakikada yaklaşık 1000 galon su göndermeliydi. Ancak bu mümkün olmadı. Söz konusu pompa, bu olaydan 42 saat önce test edilmişti ve işlevini yerine getiriyordu.

3- NRC’ye (Nükleer Düzenleme Komisyonu) bakınız: Üç Mil Adası Kazasına İlişkin Basın Konferansı, [www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/fact-sheets/3mile](http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/fact-sheets/3mile); USNRC Teknik Eğitim Merkezi Reaktör Konseptleri Kılavuzu Basınçlı Su Reaktör Sistemleri <http://www.nrc.gov/reading-rm/basic-ref/teachers/04.pdf>; Dünya Nükleer Birliği, Üç Mil Adası Kazası, <http://www.world-nuclear.org/info/inf36.html>, (Mart 2001, minör güncelleme Ocak 2010); [http://www.threemileisland.org/science/what\\_went\\_wrong/index.html](http://www.threemileisland.org/science/what_went_wrong/index.html); <http://www.threemileisland.org/downloads/354.pdf>; <http://americanhistory.si.edu/tmi/tmi03.htm>; <http://americanhistory.si.edu/tmi/03-01.htm>; NRC: Üç Mil Adası – Ünite 2”. <http://www.nrc.gov/info-finder/decommissioning/power-reactor/three-mile-island-unit-2.html>.

Ancak, testin yapılması için bir vananın kapatılması ve ardından yeniden açılması gerekiyordu. Ancak testi yapan çalışanlar, vanayı açmayı unuttmuşlardı, buna bağlı olarak da acil durum pompası çalışmamış ve su akışı sağlanamamıştı.

- Reaktör artık su kaybediyor sıcaklığı gittikçe daha da yükseliyordu. Su kaybı nedeniyle (ve basınçlandırma ünitesinde hava veya buhar olamadığından) basınç düştü.
- Basınç düşünce reaktördeki suyun bir kısmı buhara dönüştü. Bunun iki önemli sonucu oldu; ilk olarak bu durum, suyun basınçlandırma ünitesine doğru zorlanmasına ve onu tamamen doldurmasına ve ikinci olarak da, reaktör yakıtının bir kısmının su yerine buhar ile çevrelenmesine sebep oldu. Buhar, ısıyı su kadar iyi iletmemektedir, bundan ötürü yakıt peletleri ısındı.
- Bir nükleer enerji santralinde, bir kaza esnasında reaktörü soğutmak üzere suyun kolayca aktarılmasını sağlayan pompalara sahip su tankları bulunur. Bunlardan birisi otomatik olarak çalışmıştır. Bu, operatörler tarafından not edilmiştir fakat basınçlandırma ünitesine ait göstergelere baktıklarında, basınçlandırma ünitesinin suyla dolu olduğunu görmüşlerdir (bunun sebebi, reaktör çekirdeği bölgesindeki buhardır).
- Çekirdekdeki soğutucu seviyesini gösteren hiçbir cihaz yoktu. Operatörler, çekirdekdeki su seviyesini basınçlandırma ünitesindeki seviyeye bakarak değerlendiriyorlardı ve buradaki seviye yüksek olduğundan çekirdeğin uygun bir biçimde soğutucuyla kaplı olduğunu düşündüler. Söz konusu acil durum pompalarının sebepsiz çalıştığı daha önceki durumları hatırlayarak su eklemeye gerek görmediler. Bunun aksine ise aşırı kaynayan su, basınçlandırma ünitesinin suyla dolu olduğu görüntüsünü yaratıyordu ki bu, operatörlerin engellemek üzere eğitim aldıkları bir durumdu.
- Operatörler belirtilen sebeple pompaları kapattı ve suyun girmesini engellediler. Bunun ardından durum, daha da kötüye gitti.
- Kazanın başlamasından yaklaşık 100 dakika sonra soğutucu pompalarında buhar kabarcıkları oluşarak pompalarda titreşime yol açtı.
- Pompaların tamamen bozulmasından korkan operatörler bunları kapattı.
- Reaktöre hiç su girişi mevcut değilken ve reaktörden su ve buhar kaçacağı mevcutken, reaktörün büyük bölümünde soğutma olmamıştır.
- Isıyı giderecek hiç su olmadığından yakıt peletleri, kısmi bir erimeye yol açacak biçimde erimeye başladı.
- En sonunda operatör verileri gözden geçirdi ve PORV'nin açık olduğu sonucunu çıkardı, nihayet öğleden sonra 6:18'de vanayı kapattılar ve reaktöre su girişi oldu ve böylelikle öncelikli acil durum sona erdi.

Ancak, operatörlerin pompaları kapattıkları zaman ile vananın kapatıldığı zaman arasında bir miktar yakıtın erimesine yetecek kadar bir süre çekirdekte soğutma olmamıştır. Aslında kaza esnasında hiç kimse yakıtın büyük bölümünün eridiğini düşünmüyordu. Reaktör aylar sonra açıldığında, çekirdeğin fiilen %60'ının erimiş olduğu anlaşıldı.

Şekil 4 TMI-2 Kazasına Ait Olaylar Dizisinin Tamamı

TMI-2 KAZASINA  
AİT OLAYLAR DİZİSİ

28 Mart 1979'da Üç Mil Adası tarihindeki yerini, ABD tarihindeki en kötü ticari nükleer enerji kazasının yeri olarak sağlama aldı. Tıpkı radyatöründe delik olan bir otomobil motoru gibi Ünite 2 reaktörü, acil durum tahliye vanası açılıp ardından kapatılmayınca aşırı ısındı. Kumanda odasındaki operatör, problemi tanımlamakta ve düzeltmekte başarısız olunca mekanik sorun daha da kötüleşti. Sonuç ise, reaktör çekirdeğinin kısmen erimesi idi. Kazadan bu yana kullanılmayan Ünite 2 "izlenen depodur". Eylül 2014'te faaliyetine son verilip, zararlı maddelerden arındırılması planlanmıştır..

**6** Reaktördeki basınçlı buhar, pilot kumandalı tahliye vanasının (PORV) açılmasına neden oldu. Basınç düştüğünde kapanması gereken vana 2 saat 22 dakika açık kaldı.

**4** Saat öğleden önce 4:00:08 Basınçlandırma ünitesi içindeki basınç artmaya devam etti. Acil durum sistemleri reaktörü durdurdu.

**2** Su ilavesi olmaması sebebiyle buhar basıncı düştü ve güvenlik sistemleri, türbin ile çalıştığı jeneratörü otomatik olarak kapattı.

**5** Saat öğleden önce 4:00:09 Nükleer reaksiyon durdu; ancak bozunma ısı, reaktör içindeki suyun ısınmaya sürdürmesine neden oldu. Normalde buhar jeneratörlerini besleyen pompaların durmuş olması sebebiyle üç acil durum pompası otomatik olarak çalışmaya başladı.

**7** Reaktör soğutucu sistemindeki su ve buhar, bir tahliye borusundan geçerek basınç tahliye tankına doldu.

Reaktör soğutma pompası

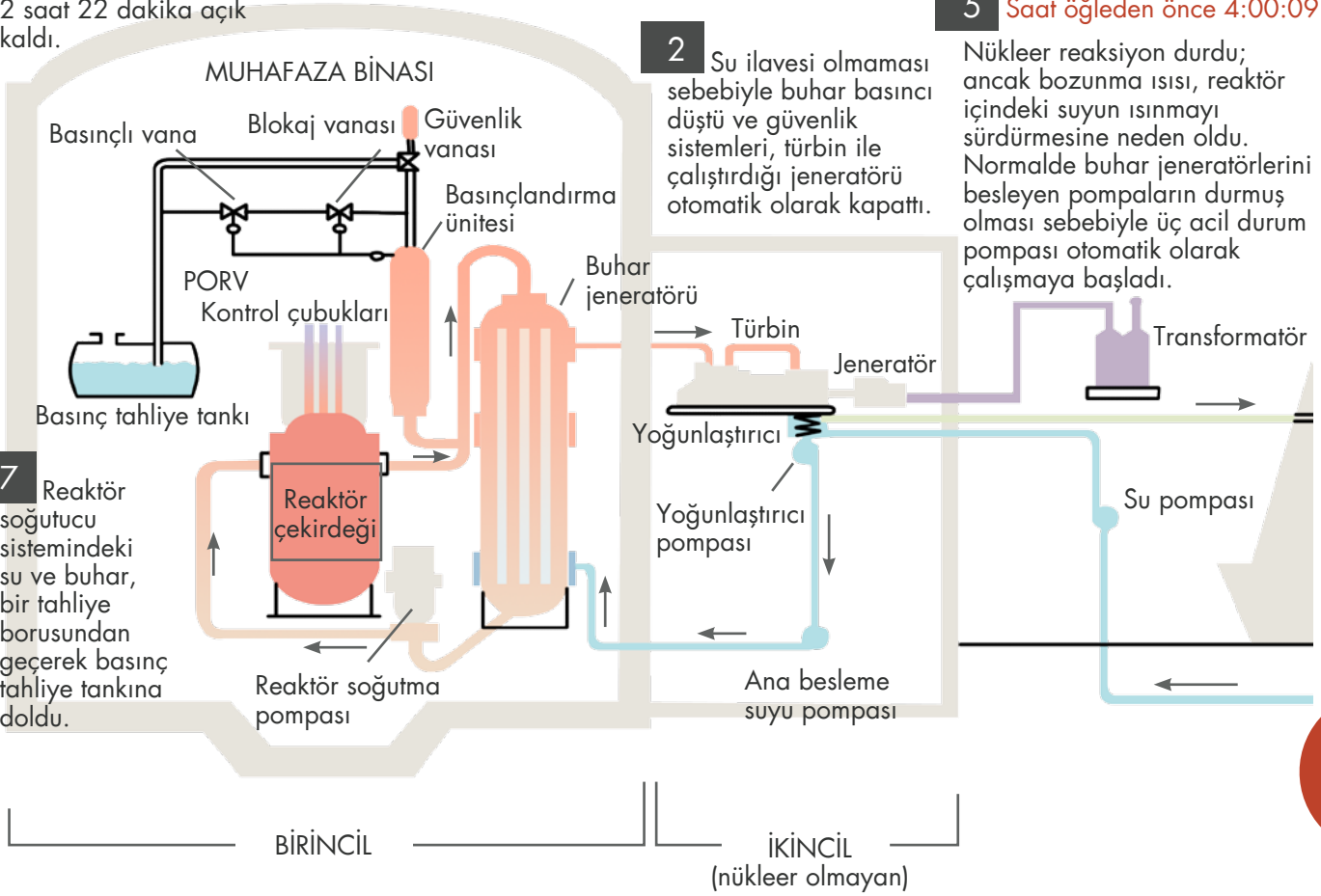
**2** Su ilavesi olmaması sebebiyle buhar basıncı düştü ve güvenlik sistemleri, türbin ile çalıştığı jeneratörü otomatik olarak kapattı.

**5** Saat öğleden önce 4:00:09 Nükleer reaksiyon durdu; ancak bozunma ısı, reaktör içindeki suyun ısınmaya sürdürmesine neden oldu. Normalde buhar jeneratörlerini besleyen pompaların durmuş olması sebebiyle üç acil durum pompası otomatik olarak çalışmaya başladı.

**3** Saat öğleden önce 4:00:02 Buhar akışındaki düşüş, reaktör soğutucusunun sıcaklığını yükselterek suyun genişmesine neden oldu.

**8** Saat öğleden önce 4:05:30 Reaktör içinde buhar suyun yerini aldı ve bunun neticesinde çekirdekte soğutma olmadı. Kazanın ilk 100 dakikasında, toplam soğutucu kapasitesinin üçte birlik miktarına tekabül eden 32.000 galon kaçak oldu. Çekirdeğin takriben yarısı eridi.

**1** Saat öğleden önce 4:00:00 Mekanik veya elektrik arızası sonucu pompaların çalışması durdu ve bu durum, buhar jeneratörünün ısıyı bertaraf etmesini önledi.



### 3.3 TMI-2 Kazasından Çıkarılan Dersler

Ticari bir Amerikan nükleer enerji santralindeki en kötü kaza olan TMI kısmi erimesi, hem ABD’de nükleer enerji sektörünün düzenleyici çerçevesine dair politikaların değişmesine neden oldu hem de halkın nükleer teknolojiye olan güvenini sarstı (NRC).

Kaza, mekanik problem ve operatör hatasına atfedildi. Reaktörün diğer koruma sistemleri de tasarlandığı biçimde işlev gösterdi. Operatörlerin müdahalesi olmasaydı acil durum çekirdek soğutma sistemi reaktörün herhangi bir biçimde hasar görmesini engelleyebilirdi (Dünya Nükleer Topluluğu, 2011).

Nuclear Regulatory Commission NRC’nin düzenlemeleri ve gözetimi, daha kapsamlı ve zorlu bir hale geldi ve santrallerin yönetimi mercek altına alındı. O günlerdeki olayların dikkatle analiz edilmesi sonucu tanımlanan problemler, NRC’nin ruhsat sahiplerinin işleyişini nasıl düzenlediğine ilişkin kalıcı ve geniş kapsamlı değişiklikler yapmasına yol açtı; bu da akabinde halk sağlığı ve güvenlik risklerini azalttı. Kazadan bu yana gerçekleşen bazı önemli değişiklikler aşağıdadır (NRC).

- Santral tasarımı ve ekipman gereksinim düzeylerinin yükseltilmesi ve bunların güçlendirilmesi. Yangın koruma sistemi, boru ağları, yardımcı besleme suyu sistemleri, muhafaza binasının izolasyonu, tek başına bileşenlerin güvenilirliği (basınç tahliye vanaları ve elektrik devre kesicileri) ve santrallerin otomatik olarak çalışmayı durdurma yeterliliklerini içermektedir;
- İnsan performansının santral güvenliğinin kritik bir parçası olarak tanımlanması, operatör eğitimleri ile personel gereksinimlerinin revizyondan geçirilmesi, akabinde santralin çalışmasına ilişkin enstrümantasyon ve kontrollerin iyileştirilmesi ve alkol veya madde alımına karşı koruma sağlamak üzere santral çalışanlarına yönelik göreve uygunluk programlarının oluşturulması;
- Kaza esnasında operasyonları engelleyen şaşırtıcı sinyalleri engellemek üzere talimatların iyileştirilmesi;
- Santral olaylarına ilişkin acil NRC bildirim gereksinimlerini içerecek biçimde acil durumlara hazırlık prosedürlerinin geliştirilmesi ve günün 24 saati personel bulunan bir NRC operasyon merkezi. Şu anda, ruhsat sahipleri ile yılda birkaç kez tatbikatlar yapılmakta ve müdahale planları test edilmektedir ve Federal Acil Durum Yönetimi Kurumu ile NRC ile yapılan tatbikatlara eyalet ve yerel düzeydeki idareler de katılmaktadır;
- Ruhsat sahiplerinin performans ve yönetim etkinliklerine ilişkin NRC gözlemlerini, bulgularını ve değerlendirme sonuçlarını periyodik bir kamu raporunda birleştirmek üzere bir program oluşturulması;
- Düzenleme makamı tarafından ilave bir dikkat gerektiren santrallerin performansının kıdemli NRC yöneticileri tarafından düzenli olarak analiz edilmesi;
- İlk kez 1977 yılında yetki verilen NRC’nin yerleşik denetleyici programının,

ruhsat sahiplerinin NRC düzenlemelerine uygun davranıp davranmadıklarına dair günlük teftiş yapmak üzere ABD'deki her santral yakınına en az iki denetçinin yerleşerek, sadece o santralle ilgili çalışma yürütecek biçimde genişletilmesi;

- Performans ve güvenlik odaklı teftişlerin yanı sıra santrallerin şiddetli kazalara açık olup olmadığını belirlemek üzere risk değerlendirme tekniklerinin kullanımının yaygınlaştırılması;
- NRC bünyesinde yürütmenin ayrı bir daire olarak güçlendirilmesi ve yeniden yapılandırılması;
- Kapsamlı nükleer düzenleme meselelerinde ortak bir sektör yaklaşımı sunmak, NRC ve diğer hükümet kurumları ile etkileşimde bulunmak üzere sektörün kendi gözetim grubu olan Nükleer Enerji Operasyonları Enstitüsünün (INPO) ve şu anki adıyla Nükleer Enerji Enstitüsünün kurulması;
- Ruhsat sahipleri tarafından kaza sonuçlarının hafifletilmesi ve radyasyon seviyesi ve santral durumunu izlemek üzere ilave ekipmanların kurulumu;
- Ruhsat sahipleri tarafından önemli güvenlik problemlerinin erken teşhisi ve bunlara dair verilerin toplanması ve değerlendirilmesine ilişkin önemli inisiyatiflerin uygulanması ve böylelikle deneyime ilişkin derslerin paylaşılması ve buna göre hızla harekete geçilmesi ve
- NRC'nin, nükleer güvenliğe ilişkin pekişmiş bilgileri, bir dizi önemli teknik alanda diğer ülkelerle paylaşmak üzere uluslararası faaliyetlerini genişletmesi.

Reaktör tasarımı açısından Üç Mil Adası Kazası, santral bünyesinde bulunan güvenlik özelliklerinin önemini gösterdi. Reaktör çekirdeğinin yarısının erimiş olması olgusuna rağmen, eriyen yakıttan salınan radyonükleidlerin çoğu, santral içinde birikti veya yoğunlaşan buharda çözüldü. Ayrıca, reaktörü çevreleyen muhafaza binası da radyoaktif maddelerin önemli miktarda salımını engelledi (Dünya Nükleer Topluluğu).

TMI-2 kazasından sonra, güvenlik performansına ilişkin endişeler, şiddetli kaza güvenliği- bu kazaların önlenmesi ve hafifletilmesi bağlamında ele alındı. Bu, birçok Hafif Su Reaktöründe uygulanan (LWR) Şiddetli Kaza Yönetimi (SAM) programları şeklinde formüle edildi. Şiddetli kaza araştırmaları sonuçları; santral güvenliğinin iyileşmesini sağlayacak biçimde santrallerin yeni veya iyileştirilmiş ekipmanlarla güncellenmesinin yanı sıra kaza yönetimi tedbirleri ve prosedürlerinin oluşturulmasına yol açmış veya herhangi bir güncelleme veya SAM tedbirleri gerektirmeyen ihtiyatlı kararlara gerekçe sağlamıştır (Sehgal 2006).



## 4 Çernobil Kazası: Çernobil Reaktörünün Tasarım Özellikleri ve Bunların Kaza Üzerindeki Etkileri

Nisan 1986'daki Çernobil Nükleer Enerji Santralindeki kaza, Soğuk Savaş kaynaklı izolasyon ve bunun doğurduğu güvenlik kültürünün eksikliğinin doğrudan sonucu olarak bir Sovyet RBMK reaktöründeki tasarım hatası ile santral çalışanları tarafından yapılan ciddi hataların birleşmesinin ürünüydü. Çernobil Nükleer Enerji Santrali, Kiev-Ukrayna'nın 130 km kuzeyinde Beyaz Rusya ile olan sınırın 20 km güneyinde yer alan RBMK-1000 tasarımı dört nükleer reaktörden oluşmaktaydı; Ünite 1 ve 2, 1970 ila 1977 yılları arasında inşa edilmiş, aynı tasarıma sahip Ünite 3 ve 4'ün yapımı ise 1983'te tamamlanmıştı. Çernobil felaketinin yaşandığı RBMK tasarımının önemli birkaç eksiği bulunmaktaydı.

RBMK (reaktor bolshoy moshchnosty kanalny) baş harfleri, kabaca "suyla soğutulan ve grafitle yavaşlatılan reaktör" olarak çevrilebilecek bir Rusça kısaltmadır. Sovyetlerin enerji üretimi için inşa ettiği iki tip reaktörden birisini tanımlamakta olup, diğeri Birleşik Devletler basınçlı kap reaktörüne benzerdir. RBMK tipi reaktör, bu iki tasarımdan eski olanıdır. Bu tasarım, öncelikle plütonyum üretimine yönelik bir tasarımdan türetildiği ve Rusya'da hem plütonyum hem de enerji üretimi için kullanıldığından, Batı tipi güç reaktörü tasarımlarından çok farklıdır. Bu tip reaktörler sadece Sovyet Sosyalist Cumhuriyetler Birliği'nde inşa edildiler ve işletildiler (NUREG 1987, Smolensk NPP 2008).

İlk RBMK (Leningrad NPP), ticari işletmeye Kasım 1974'te alındı. Kazadan önce 14 başka RBMK reaktörü daha işletmeye alındı. Böylece Çernobil kazası sırasında SSCB'de 15 RBMK işletilmekteydi. RBMK reaktörleri, tek bina kompleksinin zıt iki yönünü işgal eden iki ünite halinde çift olarak inşa ediliyordu. Leningrad'taki ilk iki ünite ile Çernobil ve Kursk NES'lerindeki reaktörler RBMK'ların ilk nesliydi. Diğerleri, ikinci nesil RBMK'lerdi. 1960'larda geliştirilen ilk RBMK reaktörünün teknik projeleri kullanılarak inşa edilmişlerdi. Bu da bütün RBMK'lerin benzer zayıflıklara sahip olduğu ve Çernobil kazasına benzer bir kazanın, kanal tipi reaktöre sahip bütün Sovyet NES'lerinde yaşanabileceği anlamına gelmektedir. (Malko; Dünya Nükleer Birliği,1986)<sup>4</sup>

## 4.1 Kazanın Ana Nedenleri

### 4.1.1 Tasarım Hataları

Çernobil reaktörleri, kazaya katkıda bulunmuş birkaç tehlikeli özelliğe sahipti. En önemlileri aşağıda verilmiştir (Malko;Howieson 1989; IAEA 1992; Denton 1987)<sup>5</sup>

- **Pozitif boşluk katsayısı**

Hemen hemen bütün reaktörlerde, sıcaklık arttığında çarpım faktörü ve dolayısıyla reaktör gücü düşer. Bu, çoğu Batı tipi reaktördeki temel güvenlik özelliğidir. Su, LRW'lerde hem soğutucu hem de yavaşlatıcı olarak davranır, böylelikle soğutucu kaybı aynı zamanda fisyon reaksiyonunu durdurur. RBMK'de yavaşlatıcı, sert grafitir ve su soğutucu, zehir gibi davranır. Başka bir anlatımla, suyun varlığı nötronları absorbe eder ve reaksiyonu yavaşlatır. Eğer soğutucu kaybı olur veya buhara dönüşürse reaktör gücü yükselir. Bu, pozitif boşluk katsayısı olarak bilinir ve ciddi bir tasarım hatasını temsil eder. Belirli işletme şartlarında güç, reaktör parçalanana kadar kontrolsüz bir şekilde artabilir. Çernobil'de olan budur. "Pozitif boşluk katsayısı" terimi çoğunlukla RBMK reaktörleri ile bağlantılıdır. Boşluk katsayısı, reaktivite güç katsayısının bütününe katkıda bulunan bileşenlerden sadece bir tanesi olmakla beraber, RBMK reaktörlerinde baskın olan bileşendir. Çernobil'deki kaza sırasında reaktivite boşluk katsayısı o kadar pozitif ki, güç katsayısının diğer bütün bileşenlerini bastırdı ve güç katsayısı pozitif oldu. Güç artmaya başladığında daha fazla buhar üretildi ve bu da akabinde güçte artışa yol açtı. Güçte yaşanan artıştan dolayı üretilen ilave ısı, soğutma devresinde sıcaklığı yükseltti ve daha fazla buhar üretildi. Daha fazla buhar, daha az soğutma ve daha az nötron absorpsiyonu demektir; bu da reaktörün nominal kapasitesinin 100 katı büyüklüğünde bir enerji artışıyla neticelenmiştir.

Boşluk katsayısı değeri, reaktör çekirdeğinin konfigürasyonu tarafından belirlenir. RBMK reaktörlerinde bunu etkileyen önemli bir faktör, işletme reaktivite marjıdır.

- **İşletme reaktivite marjı**

Tanımı kesin olmamakla beraber işletme reaktivite marjı (ORM) temel olarak, reaktör çekirdeğinde geriye kalan nominal değerdeki "eşdeğer" kontrol çubuklarının sayısıdır. Çernobil'deki operatörlerin, fiili çekirdek konfigürasyonundan bağımsız olarak 15 eşdeğer çubuk olan ORM alt sınırına sadık kalındığı sürece güvenlik kriterlerinin karşılanacağına inandıkları görülüyor. Bir ani durdurma sinyali sonrasında kontrol çubukları çekirdeğe ilk daldırıldığında, kontrol çubuklarının çekirdeğin alt bölgelerinde reaktifliği arttırdığı "pozitif ani durdurma" etkisinin farkında değillerdi.

5- Dünya Nükleer Birliği, "Çernobil Kazası Olaylar Dizisi Ek 1; Dünya Nükleer Birliği "RBMK Reaktörleri", <http://www.world-nuclear.org/info/inf31.html>; U:S: NRC Çernobil Nükleer Enerji Santrali Kazası Basın Konferansı, <http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/fact-sheets/chernobyl-bg.html>; <http://users.oewt.com/smsrpm/Chernobyl/RBMKvsLWR.html> farklar

Kazaya doğru koşan Çernobil 4'ün çekirdek konfigürasyonunda olduğu gibi ORM, reaktivite boşluk katsayısı üzerine muazzam bir etkide bulunabilir. Fazla reaktivitenin sabit emiciler ile dengelenmesinin yanı sıra yakıt zenginlik seviyesinin arttırılmasıyla ilk çekirdeklerde kabul edilemez büyüklükte boşluk katsayıları önlenir. Ancak, yakıtın yanması arttıkça söz konusu emiciler, yakıtın ışınlam seviyelerini muhafaza etmek üzere uzaklaştırılabilirler; bu durum, boşluk katsayısını pozitif yöne kaydırır ve katsayının, kontrol ve koruma çubuklarının batırılma miktarına olan hassasiyetini yükseltir.

• **Kontrol çubuklarının yetersiz kalması**

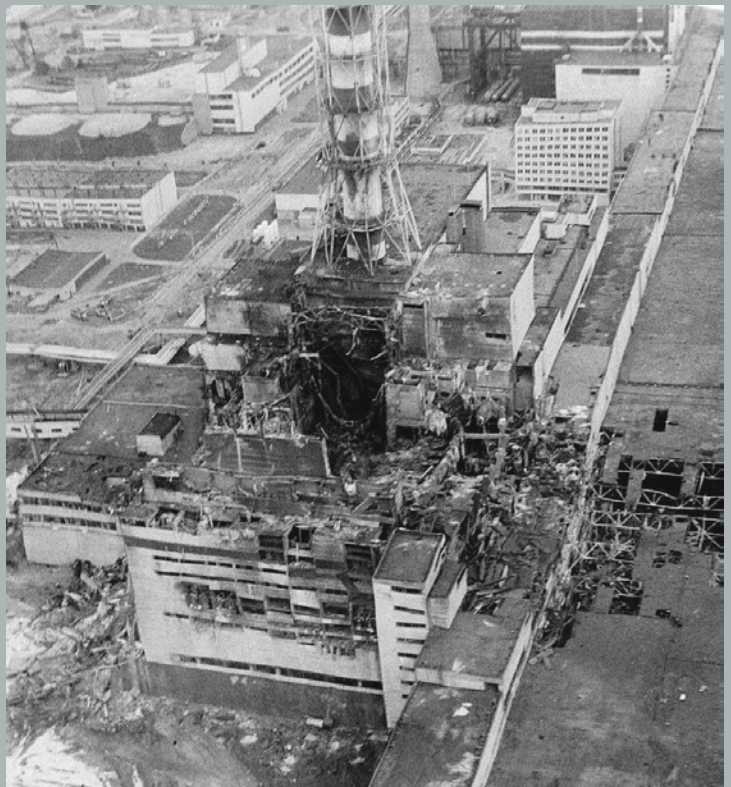
Operatörler, güçteki ani artışı fark ettiklerinde çekirdeğe kontrol çubuklarını daldırma girişiminde bulundular. Bu, yardımcı olmadı çünkü:

- Çubuklar yeterince hızlı hareket ettirilemezdi.
- Bütün çubukların alt kısmı, bor karbürden değil grafitten yapılmıştı. Bunun nedeni, çubuklar geri çekildiğinde boş alanın zehir gibi davranan su ile dolmasıydı; böylelikle geri çekilen çubukların etkisi azaltılıyordu. Bu istenen bir şey değildi, dolayısıyla her kontrol çubuğunun alt kısmına suyu dışarda tutmak için bir grafit çubuk ekleniyordu.

Operatörler, kontrol çubuklarını çekirdeğe daldırmaya başladıklarında bor karbür kısımlar çekirdeğin tamamen dışındaydılar. Grafit kısmın altında ise bir su sütunu vardı. Başlangıçta çubukların batırılması, zehir miktarının azalması demek olan suyun itilmesi yönünde etkide bulundu.

Aşırı sıcaklık çekirdeği deforme etti ve kontrol çubukları tamamen batırılmadan kımıldamaz hale geldiler.

**Şekil 5 :**  
Kazadan sonra  
Çernobil NES



- **Muhafaza olmaması**

RBMK reaktörlerinin muhafaza yapıları bulunmamaktadır. Normalde reaktörün üzerinde bulunan beton ve çelik kubbe, bir kaza anında radyasyonu santral içinde tutmak üzere inşa edilir. Çernobil santrali, muhafaza donanımı olmadan inşa edilmişti. Çoğu Batı tipi reaktörün etrafı güçlü beton binalarla çevrilidir. Eğer **Çernobil de böyle olsaydı, radyasyon çevreye yayılmayabilirdi.**

- **Grafit yavaşlatıcı**

Grafit blokların kendileri de yüksek sıcaklıklarda tutuşma özelliğine sahiptir. Patlamanın yol açtığı yangını söndürülürken bazı Sovyet vatandaşları öldü. Geniş bir alana iyot, stronsiyum ve sezyum saçılımı oldu. RBMK'de yavaşlatıcı malzeme olarak kullanılan grafit bloklar, radyoaktif maddelerin çevreye yayılmasına katkıda bulunacak biçimde reaktör çekirdeğine hava girdikçe yanmaya başladılar.

#### 4.1.2 Operatör hataları

Viyana'daki Kaza Sonrası Değerlendirme Toplantısının Sovyet katılımcılarına göre 25-26 Nisan 1986'da Çernobil NES'ndeki Ünite 4'ün personeli tarafından yapılan ağır ihlaller Çernobil kazasının ana sebebiydi. Söz konusu ihlallerin şunlar olduğu ifade edilmiştir:

- Reaktörün çok düşük işletme reaktivite fazlası (ORS) ile çalıştırılması,
- Güç, test için öngörülen seviyenin altındayken deney yapılması,
- Buhar ayrıştırıcılardaki su seviyesi ve buhar basıncına dayanarak koruma sisteminin bloke edilmesi,
- İki turbo jeneratörden gelen kapatma sinyaline dayanarak koruma sisteminin bloke edilmesi,
- Bütün devir daim pompalarının reaktöre bağlanması,
- Acil durum çekirdek soğutma sisteminin (ECCS) kapatılması.

Ancak Sternberg komisyonu, yukarıda ifade edilen ihlallerden ancak birincisine kanaat getirdi. Mevcut teknolojik düzenlemeler uyarınca reaktörün, 25 Nisan 1986 günü zaten saat 07:10'da operatör tarafından kapatılmasının gerekli olduğu belirtildi. Reaktörün gücü o saatte 1,500 MW ısı ve OSR değeri de 13,2 çubuktu. Ünite 3 ve Ünite 4'ün çalışmasına ilişkin mevcut teknolojik gereksinimler, işletme reaktivite fazlasının belirtilen güç seviyesinde belirtilen değere düştüğünde reaktörün kapatılmasını gerektiriyordu. Operatör bu şartı yerine getirmemiştir. Ancak Sternberg komisyonu, bu ihlalin kazayı başlatamayacağını veya etkileyemeyeceğini belirtmiştir (IAEA). Operatör tarafından işletme kayıt defterine yapılan kayıtlar, 25 Nisan 1986 günü saat 23:10'da ORS değerinin 23 tam çubuk olduğunu göstermektedir. Bu, saat 07:10'dan saat 23:10'a kadar geçen zaman diliminde reaktörün dördüncü ünitesinin teknolojik gereksinimlere uygun olarak çalıştığı anlamına gelmektedir.

Kaza, operatörler birkaç ciddi hata yapmamış olsaydı gerçekleşmezdi. İlk olarak bütün testlerin, işler planlandığı gibi gitmediğinde durdurulması gerekirdi.

Test, bazı güvenlik sistemleri kapalıyken başlatıldı. Güç seviyesi, pozitif boşluk katsayısının önemini artıracak biçimde planlanmış olandan düşüktü. Çekirdekte, şiddetli bir xenon zehirlenmesi vardı, dolayısıyla kontrol çubuklarının, çok düşük bir güvenli marjı bırakacak biçimde hemen hemen tamamen geri çekilmiş olması gerekiyordu. Operatörler, güç seviyesi arttığında xenon zehirlenmesinin etkisinin hızla azalacağı olgusundan tamamen habersiz görünüyordular.

## 4.2 Sonuçlar

Çernobil kazası dış koşullar, mühendislik tasarım hataları ve kötü eğitim almış operatörlerin yaptığı hataların birleşimi sonucu gerçekleşti. Test, uç işletme şartlarında başlatıldı. Türbinlere giden vananın kapatılması soğutucunun kaynamasını arttırdı. Pozitif boşluk katsayısı, akı artışıyla çekirdeğin zehirlenme oranı azaldıkça şiddetlenen bir güç dalgalanması başlattı. Bu durum, eğer çekirdekte çok uzakta bulunmasalar ve o kadar kötü tasarlanmış olmasalardı kontrol çubukları ile durdurulabilirdi. Aksine kontrol çubukları son darbeyi vurmuştu. Yakıt çubukları akkor haline gelip tamamen parçalanmışlardır. Sıcak yakıt, suyun hidrojen ve oksijen olarak ayrışmasına yol açmıştır. Soğutma sistemi buhar basıncı nedeniyle patlamış, böylelikle hidrojen dış ortamdaki hava ile reaksiyona girebilmiş ve bir kimyasal reaksiyon oluşmuştur.

Çernobil kazasının ana sebepleri; önemli tasarım eksikleri, reaktör yapımına ilişkin güvenlik yönetmeliklerinin ağır bir biçimde ihlali ve kaza öncesinde SSCB’de güvenlik kültürünün zayıf oluşuydu. Çernobil Ünite 4 kapalı olduğu esnada elektromekanik bir deney yapan operatörlerin çeşitli hatalarından bu faktörler mesuldür.

Reaktör, operatörler tarafından, çekirdekte pozitif bir reaktif güç dalgalanmasına yol açan kararsız bir çalışma rejimine sokulmuştur. Muhtemelen kaza, küçük bir sıcaklık dalgalanması nedeniyle çekirdeğin alt kısmındaki bazı yakıt kanallarında suyun kaynaması nedeniyle başlamıştır. Bütün kontrol ve koruma çubuklarının çekirdeğe batırılmasını sağlayan AZ-5 düğmesine basılması, pozitif reaktif güç dalgalanmasını azaltmak yerine yükseltmiştir. Bu, hızlı nötronlarla zincir fisyon reaksiyonlarına ve gücün kontrolsüz bir biçimde dalgalanmasına sebep olmuştur. Çekirdekte birtakım patlamaların gerçekleşmiş olması yüksek bir ihtimaldir. Bunlardan birisi, Çernobil Ünite 4’ü tahrip eden nükleer patlamaydı. Çernobil kazasını başlatan gerçek faktörleri belirlemek ve buna ilişkin gerçek bir senaryo oluşturmak için başka çalışmalar yapılmasına ihtiyaç vardır.

## 4.3 RBMK Üzerindeki Kaza Sonrası Değişiklikler <sup>6</sup>

Çernobil kazasını ışığı altında diğer RBMK reaktörleri üzerinde değişiklikler yapılmıştır. Eski Sovyetler Birliğindeki reaktörlerde, işletme güvenliğini iyileştirmek üzere aşağıdaki değişiklikler uygulamaya konmuştur:

- Reaktivite boşluk katsayısının düşürülmesi,
- Acil durum koruma sistemi müdahale veriminin iyileştirilmesi,

- İşletme reaktivite marjı (ORM; çekirdekte geriye kalan kontrol çubuklarının efektif sayısı) değerini tayin etmek üzere kumanda odasına hesaplama programları dahil edildi.
- Reaktör çalışır durumdayken acil durum güvenlik sistemlerinin baypas edilmesi engellendi,
- Çekirdek girişinde yeterli alt soğutmayı temin etmek üzere reaktör girişindeki soğutucunun nükleer kaynama oranından sapmada (DNB) düşüşe yol açan çalışma modlarından kaçınılması,

RBMK tipi santrallerde kaza sonrası gerçekleştirilen en önemli değişikliklerden birisi, kontrol çubuklarının yenilenmesiydi. (otomatik kontrol amaçlı kullanılan 12 çubuk hariç) her çubuktaki emicilerin uzunluğu boyunca iki uçtan bir grafit “yer değiştirici” eklidir. Alttaki yer değiştirici, çubuk aşağıya indirildikçe soğutma suyunun boşalan alana girmesini engeller, böylece çubuğun reaktivite değerini artırır. Ancak çubuğun ve yer değiştiricinin ebatları, çubuk tamamen batırılmış haldeyken, 4,5 metrelik yer değiştiricinin her iki ucunda 1,25 metre su bulunacak biçimde çekirdeğin yakıt bulunan kısmının tam ortasında duracak biçimdeydi. Bir ani durdurma sinyalinde, çubuk düştüğünden, kanalın alt kısmındaki su grafit yer değiştiricinin tabanı ile yer değiştirmekteydi, bu da ilk olarak çekirdek tabanının reaktivitesini arttırmaktadır. Çernobil kazasından sonra bu “pozitif ani durdurma” etkisi, kontrol çubuklarının yenilenmesi ile hafifletildi; çubuklar tamamen geri çekildikleri durumda çekirdek tabanında su bulunan bir bölge bulunmamaktadır.

FAEP sistemi, 24 acil durum koruma kontrol çubuğu en az 2β değerinde negatif reaktivite 2,5 saniyenin altında bir sürede ilave edilecek biçimde tasarlanmıştır. Ignalina ve Leningrad santrallerinde (yeni FAEP sistemi ile teçhiz edilen ilk RBMK tipi santraller) 1987-1988 yıllarında yapılan testler, bu özellikleri teyit etmiştir.

Yukarıdaki değişikliklere ilaveten, RBMK tipi santrallerde değişiklikler de yapıldı. Bu tedbirler şunları içermektedir:

- Bütün ünitelerde yakıt kanallarının yenileriyle ikamesi (Smolensk 3 hariç).
- Dağıtım kolektörü gruplarının yenileriyle ikamesi ve çek valflerin ilavesi
- Acil durum çekirdek soğutma sistemlerinde iyileştirmeler
- Reaktör boşluğu aşırı basınçtan koruma sistemlerinde iyileştirmeler
- SKALA süreç bilgisayarının yenisiyle ikamesi.

Şu anda, Çernobil’deki bütün reaktörler kapalıdır. Yaklaşık 17 adet Çernobil tipi reaktör halen faaliyettedir; bunların Çernobil’e en yakın olanları Ignaline ve Litvanya’daki iki büyük reaktördür.

## 4.4 Batı Tipi Reaktörlere İlişkin Sonuçlar

RBMK tipi reaktörler, Batıdakilerden çok farklı olması sebebiyle Çernobil kazasından öğreneceğimiz çok az şey var. Ünite 4’teki gibi kontrolsüz bir güç

artışı diğer reaktörlerin çoğunda neredeyse imkansızdır. Ayrıca, bütün Batı tipi reaktörlerin neredeyse tümü güçlü muhafaza binalarına sahiptir. Üç Mil Adasındaki kazada çekirdek kısmen erimiş olsa da, finansal bir felaketin aynı zamanda çevresel bir felaket olması gerekmeyeceğini göstermiştir.

## 5 Fukuşima Kazası / Kazaları ve Doğurduğu Sonuçlar

72

Fukuşima kazası, Ohkuma-Japonya'da 11 Mart 2011 tarihinde, 9.0 şiddetindeki Tōhoku depremi neticesi oluşan tsunami sonrasında gerçekleşmiştir. INES ölçeğinde, Çernobil gibi "geniş alana yayılan sağlık ve çevre etkilerinin" eşlik ettiği büyük miktarda radyoaktif madde salımı gösteren en yüksek seviyede (seviye 7) derecelendirilmiştir.

Ancak, Fukuşima ile Çernobil arasında çok önemli farklar bulunmaktadır. Bunlar özetle; salınım miktarı (Çernobil'in yaklaşık %10'u), muhafaza yapılarının mevcudiyeti, salınan radyonükleidler (çekirdek mevcudunun tamamı yerine çoğunlukla iyot ve sezyum izotopları), salınan maddelerin fiziksel formu (uçucular yerine çoğunlukla sıvı), bölgedeki avantajlı akıntı ve rüzgarlar ve genel neticelerinin çok daha az olmasıyla sonuçlanan nüfusun tahliyesi bakımından salınımın zamanlaması olarak açıklanabilir (Buongiorno ve arkadaşları).

Deprem vurduğunda, bölgedeki dört nükleer enerji santralindeki yedi reaktör o sırada çalışıyordu ve otomatik olarak durdular. Çalışır haldeyken duran üniteler; toplamda net 9377 MWe güce sahip Tepco Fukuşima Daiçi 1, 2, 3, Fukuşima Daini 1, 2, 3, 4, Tohoku Onagawa 1, 2, 3 ve Japco Tokai idi. Toplamda 2587 MWe (üniteler 4-6) güce sahip Fukuşima Daiçi 4-6 üniteleri o esnada çalışmamakla beraber durumdan etkilendiler. Onagawa 1, türbin binasındaki bir yangından etkilendi ancak ana problem, öncelikle Fukuşima 1-3 ünitelerinde yoğunlaşmıştı. Ünite 4, beşinci günde bir problem haline geldi.<sup>7</sup>

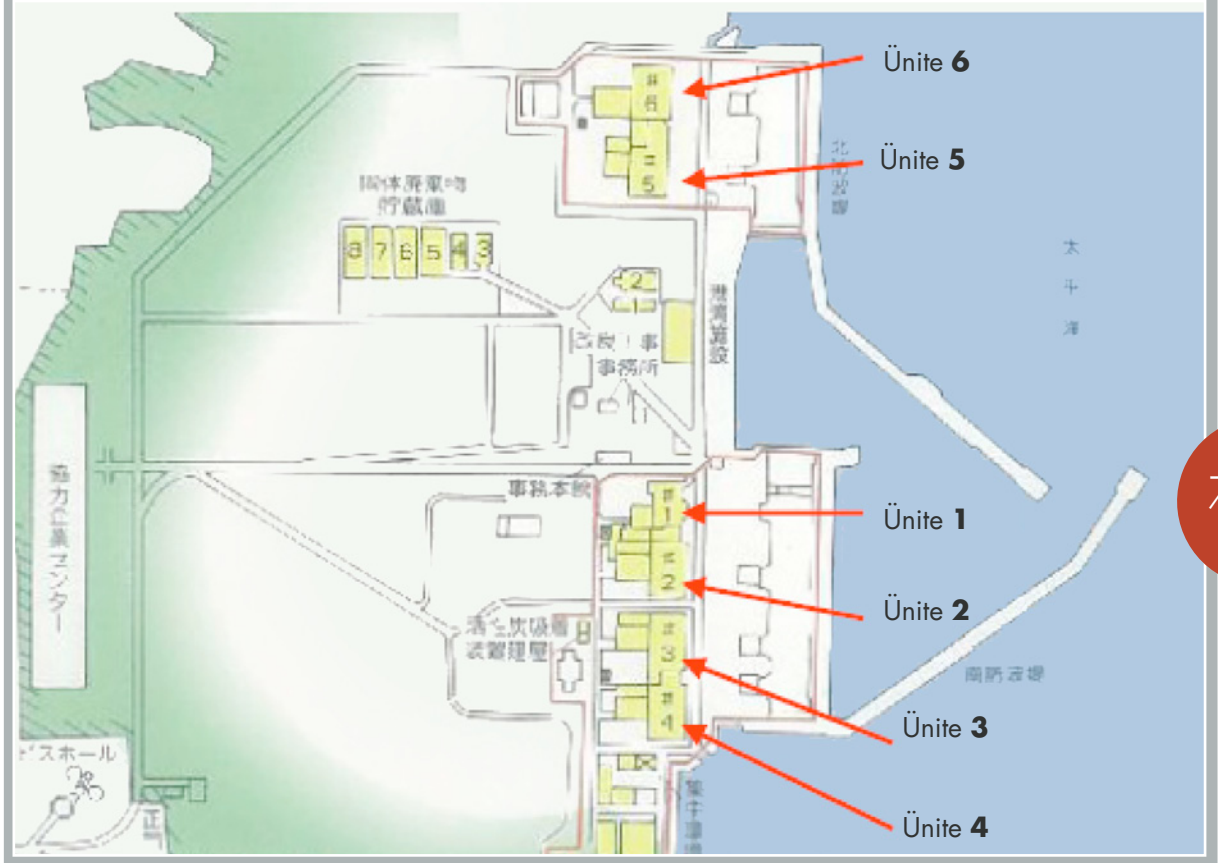
7- Dünya Nükleer Birliği, "Fukuşima Kazası 2011" [http://www.world-nuclear.org/info/fukushima\\_accident\\_inf129.html](http://www.world-nuclear.org/info/fukushima_accident_inf129.html); Japon Hükümetinin IAEA Nükleer Güvenlik Bakanlar Konferansına Sunduğu Rapor "TEPCO Fukuşima Nükleer Enerji Santrallerindeki Kaza", Haziran 2011 <http://www.iaea.org/newscenter/focus/fukushima/japan-report/cover.pdf>,

## 5.1 Fukuşima Daiçi Nükleer Enerji Santrali

Fukuşima Daiçi NES, neredeyse kare şeklinde bir sahadır ve yüzey alanı yaklaşık 1,47 milyon metrekaredir. Ünite 1'in Nisan 1982'de işletmeye alınmasından itibaren ilave reaktörler inşa edilmiş olup, şu anda dört reaktör bulunmaktadır. Tesislerin toplam enerji üretim kapasiteleri 4,4 milyon kilowattır.<sup>8</sup>

Fukuşima Daiçi reaktörleri, GE, Toshiba ve Hitachi tarafından tedarik edilen ve Mark I muhafazalı olarak bilinen (1960'lar) erken dönem tasarıma sahip Kaynar Su Reaktörleridir (BWR'ler). 1-3 reaktörleri ticari olarak işletilmeye 1971-1975'te başlamışlardır.

Şekil 6 : Fukuşima Daiçi NES Genel Yerleşim Planı<sup>9</sup>



BWR Mark I Birincil Muhafaza Sistemi, takviyeli beton donanım üzerine 30mm çelikten ampul biçiminde müstakil Birincil Muhafaza Kabından (PCV; aynı zamanda kuru kuyu olarak bilinmektedir) oluşmaktadır. PCV, reaktör basınç kabını (PRV) içermekte ve altında baskılama havuzu (üniteler 2-5'te 3000 m<sup>3</sup> suyla

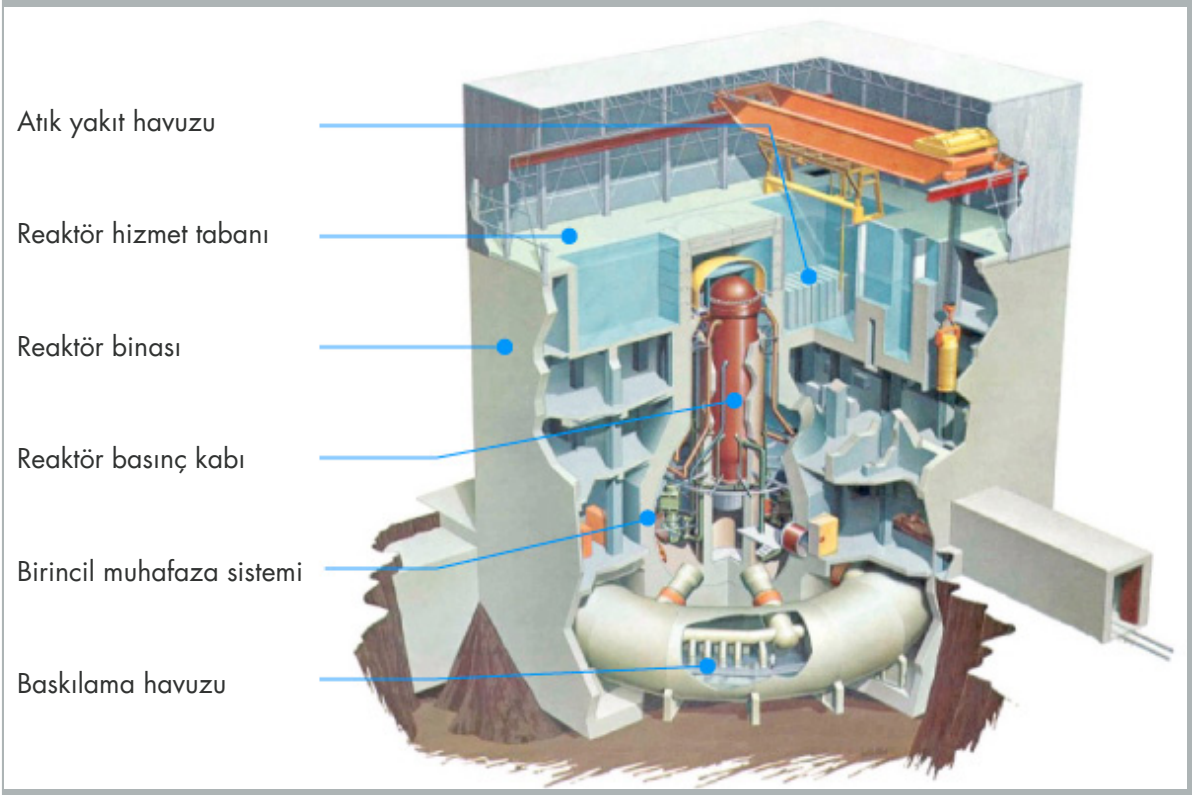
8- Japon Hükümetinin IAEA Nükleer Güvenlik Bakanlar Konferansına Sunduğu Rapor "TEPCO Fukuşima Nükleer Enerji Santrallerindeki Kaza", Haziran 2011 <http://www.iaea.org/newscenter/focus/fukushima/japan-report/cover.pdf>,

9- Aynı kaynak.



beraber) bulunan yumru biçimli bir sulu kuyuya bağlıdır. Bakılama havuzundaki su, bir kaza anında enerji emici bir ortam gibi davranmaktadır. Sulu kuyu kuru kuyuya, baskılama havuzu suyunu kuru muhafazada yüksek basınç olması durumunda tahliye eden bir menfez sistemi ile bağlanmıştır. Birincil muhafaza sisteminin işlevi, her ebattaki reaktör soğutucu borusunda meydana gelen herhangi bir soğutucu kaybı kazasında açığa çıkan enerjiyi tutmak ve reaktörü dış saldırılardan korumaktır.<sup>10</sup>

Şekil 7: BWR-3 Reaktörü<sup>11</sup>



74

## 5.2 Kazanın Sebepleri ve Mevcut ve Gelecekte Yapılacak Santrallere Yönelik Muhtemel Düzeltici Faaliyetler

Kazanın sebepleri ile mevcut ve gelecekte yapılacak santrallere yönelik muhtemel düzeltici faaliyetler MIT Raporunda özetle aşağıdaki gibi belirlenmiştir:

**1. DC bataryaların hızla boşalmasıyla birleşen saha dışı enerji kaybı (deprem nedeniyle) ve saha içi AC enerji kaybı (tsunami nedeniyle), reaktörün tümünde bir elektrik kesintisine yol açmış ve bu da akabinde yakıtın aşırı ısınmasına ve hasarına neden olmuştur.**

10- Dünya Nükleer Birliği, "Fukuşima Kazası 2011"  
[http://www.world-nuclear.org/info/fukushima\\_accident\\_inf129.html](http://www.world-nuclear.org/info/fukushima_accident_inf129.html)

11- Buongiorno ve arkadaşları

### **Mevcut santraller için muhtemel düzeltici faaliyetler**

- Tsunami veya sel baskınları durumunda saha içi AC enerji kaybını önlemek üzere dizel jeneratörler, bunların yakıtları ve bağlantılı şalt tesislerinin yeterli yükseklikteki odalarda ve/veya su yalıtımlı odalar içine alınabilir.
- AC enerjinin yeniden devreye alınması için hızla sahaya iletilebilecek (örneğin havadan, karadan veya sudan) dizel jeneratörler veya gaz türbinli jeneratörler bulundurulabilir

### **Gelecekteki santrallere yönelik muhtemel tasarım iyileştirmeleri:**

- Tetikleyici dış olayın gerçekleşmesi üzerine pasif sistemlerin muhtemel arıza modlarını da dikkate alan risk değerlendirmesi de dahil olmak üzere analiz yapmak suretiyle doğru kararın belirlenmesi yoluyla dış müdahaleye dayanmaksızın elektrik kesintisi senaryosunun üstesinden gelmek için pasif ve aktif güvenlik sistemlerinin bir karması cazip olabilir.

**2. Yetersiz yakıt soğutmanın neden olduğu aşırı yakıt ısınması, hızlı oksitlenmeye ve büyük miktarlarda hidrojen oluşumuna yol açmış, bu da nihayetinde Ünite 1 ve 3'teki reaktör binalarının infilak etmesine/tahrip olmasına ve Ünite 4'ün de muhtemelen yanmasına sebebiyet vermiştir. Ancak, reaktör binalarında hidrojen birikimine yol açan mekanizma bu ana kadar netleşmemiştir.**

### **Mevcut ve gelecekte yapılacak santraller için muhtemel düzeltici faaliyetler:**

- Basıncılı kaplarda tahliyenin ABD'de uygulandığı üzere bacaya bağlı güçlü borularla yapılması. Tahliye güç kullanılmadan yapılabilmelidir.
- Santrallerin havuz bölgelerinde, santral bacalarına daha doğrudan bağlantılarla hava ortamı bulunmalıdır. Ayrıca, binalarda (güç kaybı durumunda) arıza durumunda açılan havalandırma panjurları kullanılabilir.
- Hidrojenin birikebileceği binanın üst bölgelerindeki küçük salımlar için daha fazla miktarda hidrojen birleştiriciler (pasif) ve tutuşturucular (aktif) değerlendirilebilir. Ayrıca, zaten sağlanmış olduğu üzere havalandırma sisteminde ve muhafaza içinde katalitik birleştiriciler kullanılabilir.
- Muhafazadaki gazların kütleli tahliyesi için hidrojen tutuşturucular araştırılabilir.
- Buharla oksitlenme sonucu hidrojen üreten maddelerin kullanımı azaltılabilir veya bırakılabilir; örneğin Zinkonyum alaşımı kaplamanın daha düşük reaktiflikteki malzemelerle ve nihayetinde SiC gibi seramik malzeme ile değiştirilmesi.

**3. Reaktördeki elektrik kesintisi nedeniyle operatörler muhafazada aşırı basınç oluşmaması için muhafazayı (soğutmak yerine) tahliye ettiler. Tahliye edilen bazı gazlar, (yine reaktördeki elektrik kesintisi nedeniyle) hiç havalandırma bulunmayan reaktör binasına sızdı, bu da hidrojen birikmesine ve nihayetinde Ünite 1 ve 3'teki reaktör binalarının infilak etmesi/tahrip olması ile sonuçlandı.**

#### **Mevcut santraller için muhtemel düzeltici faaliyetler**

- Muhafazanın soğutması çalışmadığında muhafaza muhteviyatı, doğrudan bacaya tahliye edilmelidir. Enerji kesintisi durumunda otomatik olarak aktifleşen bir katalitik birleştirici sistemi de araştırılabilir.

#### **Geleceğe yönelik muhtemel iyileştirmeler:**

- Pasif muhafaza soğutma sistemi, AC enerji kesintisi durumunda muhafaza basıncını düşürmek amacıyla muhafaza muhteviyatının tahliye edilmesi ihtiyacını ortadan kaldırabilir.
- Filtreli/havalandırılmalı muhafaza konsepti (Fransız-İsveç örnekleri), muhafaza soğutması devre dışıyken muhafaza basıncının ve atmosfere yapılan radyoaktivite salımının kontrol edilmesine dengeli bir yaklaşım sunabilir.

#### **4. Fukuşima santralinden en büyük radyoaktivite salımları, tüketilmiş yakıt havuzlarından olabilir. Tüketilmiş yakıt havuzlarında:**

Tüketilmiş yakıt havuzlarının yükseltilmiş yerleşimi, Ünite 1, 3 ve muhtemelen 4'teki reaktör binalarının hidrojen patlamaları kaynaklı hasara maruz bırakmıştır.

Tüketilmiş yakıt havuzu soğutma sisteminin iş göremez hale gelmesi Ünite 4'teki havuz yangınına yol açmış ve bir hafta süreyle gayri nizami soğutma çabalarını zorunlu kılmış olabilir (örneğin; helikopterler, tazyikli su araçları).

Deprem yol açtığı havuzlardan su sızıntısı (bu ana kadar teyit edilmemiştir) durumu kötüleştirmiş olabilir.

#### **Mevcut santraller için muhtemel düzeltici faaliyetler:**

- Tüketilmiş yakıt yapıları, mümkün olduğunca kısa sürede kuru stoka alınmalıdır. Kuru kapların, daha sıcak yakıt yapılarında hava soğutması sağlamak üzere "şapkalı" baca ile yeniden tasarlanması. Ancak,
  - (i) Bir deprem veya kasırga / tayfun nedeniyle kapların devrilmemesi temin edilmelidir; eğer kaplarda gedik açılırsa (suyun bir miktar temizleme etkisi gösterdiği havuzların aksine) radyoaktivite salımı hafifletilemez,
  - (ii) Havuzlardaki bozunma ısısının yeni tahliye edilen yakıtla bastırılması, böylelikle eski yakıtın kuru kaplara alınması bir kaza esnasında havuzun ısınma süresi üzerinde o kadar önemli bir etkide bulunmayabilir. Söz konusu belirsizlikler hızlandırılmış kuru depolamanın, saha içi kullanılan yakıt havuzları veya merkezi ara depolama gibi diğer seçenekler için de gerçekten tercih edilebilir olup olmadığı hususunun netlik kazanamamasına yol açmaktadır.
- Mevcut kullanılan yakıt havuzları, tetikleyici dış olaya karşı koyabilecek bir pasif soğutma sistemi ile yenilenebilir.
- Yakıt ikmali nedeniyle duruşlar esnasında çekirdek yükünün tamamen

havuzlara boşaltılması ve kullanılmış yakıt havuzlarının konumlandırılmasına ilişkin politikalar yeniden gözden geçirilmelidir.

#### **Geleceğe yönelik muhtemel iyileştirmeler:**

- Kullanılmış yakıt havuzları, reaktör binasından ayrı bir muhafaza benzeri yapı içine alınabilir. (Bazı PWR santrallerinde kullanılmış yakıt havuzları mevcut muhafazanın içerisinde yer almaktadır.)
- Bölgesel veya ulusal birleşik kullanılmış yakıt ara depolama tesisleri, santraldeki tüketilmiş yakıt mevcudunu azaltacak ve bunun sonucu olarak da kullanılmış yakıt havuzu kazalarındaki riski düşürecektir. İlginç biçimde Japonlar yakın bir zamanda Rokkasho'da bir yeniden işleme tesisini tamamlamışlardır ve 10-15 yıl içinde kullanılmış yakıtlarını, uzun sürelerle reaktör sahalarında tutmak yerine tümüyle buraya sevk etmeleri muhtemeldir.

**5. Bu sahanın kompakt tasarımından ötürü, bir üniteadaki sorunlar komşu ünitelere de sıçramış ve güvenlik riskleri yaratmıştır. Ünite 3'teki hidrojen patlaması, Ünite 2'de deniz suyu enjeksiyonu için kullanılan bazı yangın pompalarını iş göremez duruma getirmiştir. Ayrıca Ünite 4'teki yangına/patlamaya, Ünite 4 ile ortak kullanılan borular nedeniyle Ünite 3'ten salınan hidrojen kaçağının neden olduğu iddia edilmiştir. 1-4 ünitelerinden uzak olan Ünite 5 ve 6, Ünite 1'deki hidrojen patlamalarından etkilenmemişler ve tek bir dış olay (tsunami), santraldeki 13 dizel jeneratörün hepsini aynı anda çalışmaz duruma getirmiştir. Fukuşima-Daiçi yakınında bulunan Fukuşima-Daini ve Onagawa santrallerinin her ikisi de büyük bir hasar olmaksızın depremi ve tsunamiyi atlattımlardır.**

#### **Mevcut santraller için muhtemel faaliyetler:**

- Yerleşim planının farklılaştırılması ve çok üniteli sahalarda reaktörlerin konumlandırılması gözden geçirilmelidir. Örneğin, en az bir jeneratör odası zeminin yeterince üstünde bir konuma (tsunamilerden korunmak üzere) ve bir tanesi de zemin altına (uçak kazalarından korunmak üzere) yerleştirilebilir. Ayrıca gelecekte yapılacak santrallerde, idari binalar ve park alanları üniteler arasındaki fiziksel ayrımı artırmak üzere üniteler arasına yerleştirilebilir.

#### **Geleceğe yönelik muhtemel iyileştirmeler:**

- Gelecekte yapılacak santrallere ilişkin bir yaklaşım, büyük depremler, tsunamiler ve sellerin yol açacağı hasar olasılığını büyük oranda düşürmek (ve belki de bertaraf etmek) üzere yapılacakları sahanın sismik alanlardan ve kıyılardan uzakta seçilmesidir.
- İnsanların kıyılara ve faylara (nehir vadileri) yakın yerlere toplanma eğiliminde oldukları not edilmiştir; bundan ötürü olumsuz dış olay olasılığını minimize etmek ve yoğun nüfuslu bölgelere mesafenin maksimize edilmesi arasında güçlü bir sinerji bulunmaktadır. Japonya, Tayvan ve Kaliforniya'daki santraller haricinde tüm dünyada nükleer santrallerin büyük bölümü yüksek sismik değerdeki alanlardan uzaktadır. Bu bölgelerde beklenen daha yüksek

yer hareketlerinin üstesinden şu anda, bu alanlara inşa edilmiş santrallerin daha zorlayıcı sismik tasarımları ile gelinmektedir.

- Bir santralde izin verilebilecek ünitelerin sayısı, çoğu kez çelişen aşağıdaki faktörleri dikkate alan bir analize dayanarak belirlenebilir:

- (i) Aynı faktörden kaynaklanan kırılmalıkların azaltılması,
- (ii) Bütün üniteleri etkileyen şiddetli bir kazada kullanılacak personel ve kaynakların hazır bulundurulması,
- (iii) Yüksek standartlaştırma (paylaşımlı öğrenme),
- (iv) Paylaşımlı ekipman (ekonomik ve güvenlik açısından doğurdukları sonuçlarıyla birlikte),
- (v) Çok üniteli soğutmanın düşük çevresel etkisi.

## Referanslar

AEA (1994) Yeni nesil su reaktörlerine yönelik gelişmiş muhafaza sistemlerinin durumu, IAEA-TECDOC-752, Viyana

AREVA, EPR – Nükleer Santral Kesiti

[http://www.eprreactor.co.uk/ssmod/liblocal/docs/EPR%20Interactive/Brochures/EPRFeatures\\_32x34.pdf](http://www.eprreactor.co.uk/ssmod/liblocal/docs/EPR%20Interactive/Brochures/EPRFeatures_32x34.pdf)

Buongiorno, J. Ve arkadaşları, “Fukuşima-Daiçi Kazasından Öğrenilen Teknik Dersler ve Nükleer Endüstri için Muhtemel Düzeltici Faaliyetler: Bir İlk Değerlendirme”, MIT Fakülte Raporu MIT-NSP-TR-025.

Castleberry, G. W. Babcock ve Wilcox Basıncılı Reaktörler, Doktora dersi E183. Babcock ve Wilcox P.

Corradini, M.L. (2003), Gelişmiş Nükleer Enerji Sistemleri, Isı Transfer Sorunları ve Eğilimler, Isı Transferinde Gelecekteki Eğilimler Hakkında Rohsenow Sempozyumu: MIT, 16 Mayıs <http://web.mit.edu/html/www/papers/CORRADINI.pdf>

Denton, H.R.(1987), “Çernobil nükleer kazasının sebepleri ve neticeleri ile ABD nükleer enerji santralleri yönetmeliği üzerinde doğurduğu sonuçlar”, Nükleer Enerji Yıllıkları, Cilt 14, Sayı 6, sayfa 295-315.

Dünya Enerji Kurumu, Gelişmiş Nükleer Enerji Reaktörleri, <http://www.world-nuclear.org/info/inf08.html>

Dünya Nükleer Topluluğu, Nükleer Enerji Reaktörlerinin Güvenliği, (24 Haziran 2011 tarihinde güncellenmiştir) <http://www.world-nuclear.org/info/inf06.html>.

Dünya Nükleer Birliği, “Fukuşima Kazası 2011” [http://www.world-nuclear.org/info/fukushima\\_accident\\_inf129.html](http://www.world-nuclear.org/info/fukushima_accident_inf129.html)

Dünya Nükleer Birliği, Üç Mil Adası Kazası, <http://www.world-nuclear.org/info/inf36.html>, (Mart 2001, minör değişiklik 2010).

[http://www.threemileisland.org/science/what\\_went\\_wrong/index.htm](http://www.threemileisland.org/science/what_went_wrong/index.htm)

Dünya Nükleer Birliği (1986), Çernobil Kazası <http://www.world-nuclear.org/info/chernoby1/inf07.html>

Dünya Nükleer Birliği, “Rusya’da Nükleer Enerji <http://www.world-nuclear.org/info/default.aspx?id=26576&terms=floating>.

Dünya Nükleer Birliği, “Çernobil Kazası Olaylar Dizisi Ek 1”

Dünya Nükleer Birliği “RBMK Reaktörleri”, <http://www.world-nuclear.org/info/inf31.html>

Ekonomik ve Basitleştirilmiş Kaynar Su Reaktörü (ESBWR) Tasarım Belgelendirme Başvurusu İncelemesi <http://www.nrc.gov/reactors/new-reactors/design-cert/esbwr.htm>

"Energoatom Concern OJSC " Smolensk NES " Santral Hakkında " Nesil" Snpp. rosenergoatom.ru <http://snpp.rosenergoatom.ru/eng/about/production/> Retrieved 2010-03-22.

Frogatti, A., (2005), "Üç Mil Adası Sırasında Gerçekleşen Olayları Gösteren Zaman Çizelgesi", Nükleer Reaktörlerin Riskleri, Nükleer Sorunlar Makale No. 2, Heinrich Böll Vakfı [18] K.E. Holbert, Üç Mil Adası (TMI-2) <http://holbert.faculty.asu.edu/eee460/TMI-2.pdf>

Henry, R. E. (2007). "TMI-2: Şiddetli Kaza Yönetimi Ders Kitabı", Uluslararası ANS/ENS Toplantısı, [www.nanodata.com/.../ThreeMileIsland-severe-accident-management-2007.pdf](http://www.nanodata.com/.../ThreeMileIsland-severe-accident-management-2007.pdf)

IAEA (2011), Fukuşima Nükleer Kazası Güncelleme Günlüğü 2 Haziran 2011 Tarihli Güncellemeler.

IAEA (2008), INES Uluslararası Nükleer ve Radyolojik Olay Ölçeği Kullanıcı Kılavuzu 2008 Basımı, Uluslararası Atom Enerjisi Kurumu Viyana, [http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/INES-2009\\_web.pdf](http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/INES-2009_web.pdf).

IAEA, Nükleer Enerji Santrallerinde Derinlemesine Savunma Değerlendirmesi, [http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1013e\\_web.pdf](http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1013e_web.pdf)

IAEA (1992), "Çernobil Kazası: INSAG 1 Güncellemesi"-, GÜVENLİK SERİSİ No. 75-INSAG-7, Uluslararası Nükleer Güvenlik Tavsiye Grubunun Raporu, IAEA Viyana, ([http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub913e\\_web.pdf](http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub913e_web.pdf))

Lee, S., ve K. Suhi (2009), "Gelişmiş Enerji Reaktörü 1400'ün Tasarım Özellikleri" Nuclear Engineering and Technology, Cilt 41, No 8

Malko, M. V. 'Çernobil Reaktörü: Tasarım Özellikleri ve Kazanın Sebepleri' <http://www.rri.kyoto-u.ac.jp/NSRG/reports/kr79/kr79pdf/Malko1.pdf>

Misak, J., "Yeni nesil reaktörlerin uygulaması ile bağlantılı güvenlik değerlendirme sorunları", [http://www.eurosafe-forum.org/userfiles/1\\_09\\_Jozef%20Misak%20EUROSAFE%20presentation.pdf](http://www.eurosafe-forum.org/userfiles/1_09_Jozef%20Misak%20EUROSAFE%20presentation.pdf).

Mitchell, R. ve G.T: Frampton (1980). Üç Mil Adası: Komisyon Üyeleri ve Halk Raporu, Cilt I, Nükleer Düzenleme Komiyonu, Özel Tahkikat Grubu. <http://www.threemileisland.org/downloads/354.pdf>

Modro, S. M. ve M. W. Jankowski (2006), "Nükleer Enerji Santralleri Güvenlik Güncellemelerinde Sağlanan Kazanımlar, Polonya NPPP Nükleer Enerji Santralleri

Morozov, A., A. Soshkina (2008), "Yeni Nesil NES'leri için Pasif Çekirdek Soğutma Sistemleri: Özellikler ve Teknolojinin Bilinen Durumu", Makale No. 236 Interlaken, İsviçre

NRC, Çernobil Nükleer Enerji Santrali Kazası Raporu,NUREG-1250 Washington, DC , Ocak 87.

NRC Çernobil Nükleer Enerji Santrali Kazası Basın Konferansı, <http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/fact-sheets/chernobyl-bg.html>

Sehgal, B. R. (2006). "Hafif Su Reaktörü (LWR) Safety, Nuclear Engineering and Technology, Cilt.38, No:8

Snell J., V.G..Q. Howieson (1989) AECL, 1989. Çernobil- Kanadalı Bakış Açısı <http://canteach.candu.org/library/19910101.pdf>

Japon Hükümetinin IAEA Nükleer Güvenlik Bakanlar Konferansına Sunduğu Rapor "TEPCO Fukushima Nükleer Enerji Santrallerindeki Kaza", Haziran 2011 <http://www.iaea.org/newscenter/focus/fukushima/japan-report/cover.pdf>,

Teeghman, D. "En kötü 5 Nükleer Felaket", <http://news.discovery.com/tech/top-five-nuclear-disasters.html>

USNRC Teknik Eğitim Merkezi Reaktör Konseptleri Kılavuzu Basınçlı Su Reaktör Sistemleri <http://www.nrc.gov/reading-rm/basic-ref/teachers/04.pdf>