

# Nükleer Santraller ve Güvenlik

Bir nükleer santral işletimi sırasında çevreye hemen hemen hiçbir zararlı madde salmazken, meydana gelebilecek bir kazada çevresine çok büyük zarar verme potansiyeline sahip. Bir nükleer santral kazasının etkisi, geleneksel enerji santrallerinde meydana gelebilecek bir kazanın etkisiyle karşılaştırılmayacak ölçüde büyük. Bu nedenle nükleer enerji santrallerinde güvenlik ve güvenilirlik öncelikli bir konu. Sayıları az da olsa yaşanan kazaların sonucunda ve toplumun nükleer enerjiye tepkisel yaklaşımının da etkisiyle nükleer santrallerdeki güvenlik önlemleri gündemde geniş bir yer tutuyor.

**D**ünyanın giderek artan enerji ihtiyacını karşılayabilmek için göze alınan riskler de giderek artıyor. Günümüzde yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı ne kadar güvenliyse, bu kaynaklardan elde edilen enerjinin yoğunluğu da bir o kadar düşük. Günümüzün başlıca enerji kaynağı olan ve kömür, petrol ve doğalgaz gibi fosil yakıtlardan elde edilen enerjinin yoğunluğu yüksek olsa da bunlar yenilenebilir kaynaklar değil ve çevreye verdikleri zarar çok büyük. Bu kaynakların kullanımı sırasında ortaya çıkan atıkların, uzun dönemde çevreye zarar verme potansiyeli çok yüksek. Görece temiz enerji sağladığı düşünülen hidroelektrik santrallerse tüm dünyada başlıca enerji kaynaklarından biri, ancak onlar da çevreye ve ekosisteme verdikleri zararlar nedeniyle eleştiriliyor.

Günümüzde bu enerji kaynaklarına en güçlü alternatif nükleer enerji olarak görülüyor. Bu nedenle tüm risklerine ve tüm karşıt görüşlere karşın nükleer enerjiden vazgeçilmesi mümkün görünmüyor. Bunun yerine, bu kaynaktan en verimli ve en güvenli şekilde nasıl yararlanılabileceği üzerine çok kapsamlı araştırmalar yürütülüyor.

Tarihe bakacak olursak, nükleer enerji kaynaklı kazaların sayısı çok az. Hem toplum sağlığı açısından hem de mali açıdan düşününce risk çok büyük olduğu için, mühendisler bu santrallerin tasarımını yaparken bir kazaya yol açabilecek her türlü etkeni öngörmek durumunda. Geçmişte yaşanan kaza sayısı az olmakla birlikte, yeni santraller tasarlanırken bu kazalardan önemli dersler çıkarılıyor.

## Kötü Örnek: Çernobil

Tarihteki en büyük nükleer santral kazası olan Çernobil nükleer santralinde yaşanan kaza, güvenlik önlemlerinin ne kadar önemli olduğunu tüm dünyaya gösterdi. Uzmanlar, Çernobil'de yaşananların bir nükleer reaktörde olabilecek en kötü kaza olduğunu belirtiyor. Kazaya yol açan olaylar ve reaktör tasarımı göz önünde bulundurulduğunda, bu olaydan önemli dersler çıkarılıyor. Çernobil kazası, özellikle güvenlik ve güvenilirlikle ilgili neler yapılmaması gerektiği konusunda bizi aydınlatıyor. O nedenle nükleer santral güvenliği konusuna girmeden önce bu kazanın nasıl olduğuna kısaca değinmekte yarar var.

Çernobil'deki kaza bir deney sırasında oldu. Deneğin amacı sorunlu olduğu bilinen soğutma sisteminin yedek ünitelerinin gerektiği gibi çalışıp çalışmayacağını görmektir. Santraldeki reaktörlerden her biri 1600 yakıt kanalı içeriyordu ve sağlıklı bir soğutmanın gerçekleşebilmesi için bu kanalların her birinden saatte 28 ton su geçmesi gerekiyordu. Bu suyu sağlayan pompaların elektriği kesildiğinde gerekli gücü sağlayacağı düşünülen üç dizel jeneratör 15 saniye içinde devreye giriyor ancak yeterli güce ulaşmaları bir dakikadan uzun sürüyordu. Soğutma suyunun devretmeyeceği bu bir dakikalık süreyle kabul edilebilir değildi. Bu aslında bir tasarım hatasıydı. Söz konusu deney, bu hatayı telafi edecek bir çözümle ilgiliydi. Dış elektrik kaynağı devre dışı kaldığında, santralin elektrik üreten türbinlerinin hareket enerjisi ve buhar basıncıyla bir dakika boyunca pompaların çalışmasına

yetecek kadar elektrik üretebileceği düşünülüyordu. Bu da dizel jeneratörler devreye girene kadar su pompalarını çalıştırmaya yetecekti. Aslında deney daha önce de iki kez tekrarlanmış ve başarısız olmuştu.

Reaktör çalışanları deneyi reaktörün bakıma alındığı döneme denk getirmeyi uygun gördü. Böylece deney yüzünden elektrik üretiminde kesinti olmayacaktı. Ne var ki deneyin gerçekleşebilmesi için reaktörün tam güce yakın bir performansla çalışması gerekiyordu. Bakım için kapatılmış reaktörü hızlandırma çabaları ve deneyin gerçekleşebilmesi için diğer güvenlik sistemlerinin devre dışı bırakılması sonucunda reaktör kontrol dışında hızlandı. Çok kısa süre içinde, deneyden yaklaşık bir dakika sonra, bir patlama meydana geldi. Bunun ardından, aşırı ısınan reaktörün tepkimeleri kontrol etmede kullanılan grafit içeren kalbi, kısmen de olsa yanmaya başladı. Grafitin kazanın oluşumunda rolü olmasa da yüksek sıcaklıkta saldırdığı karbon monoksit yanabilir bir gaz olduğundan durum daha da kötüleşti.

Çernobil kazasında reaktör kabının basıncın etkisiyle patlamasıyla radyoaktif yakıtın önemli bir bölümü reaktörün dışına, çevreye yayıldı ve yangının da etkisiyle atmosferin yükseklerine (yaklaşık 18 km) taşınarak Rusya ve Avrupa başta olmak üzere geniş bir alana yayıldı.

Bu güne kadar reaktör kalbinin eridiği 10 kadar kaza meydana geldi. Bunların ikisinin, Çernobil'deki ve Three Mile Island'daki (Üç Mil Adası) kazaların dışındakilerin çoğu, askeri reaktörlerde ve deneme reaktörlerinde oldu ve genelde küçük çaplı kazalardı.

Geçtiğimiz ay, Japonya'daki depremin ardından Fukushima Dai-ichi'de (Fukuşima 1 numaralı santral) yaşanan olayın Çernobil'e dönme olasılığının bulunmadığı ifade ediliyor. Çünkü santralin tasarımı, kullandığı yakıtın özelliği ve güvenlik önlemleri çok daha farklı. Yine de bir doğal afetin nükleer bir kazaya yol açması, güvenlik önlemleri alınırken risklerin doğru değerlendirilemediğini gösteriyor. Japonlar kriz yönetimi konusunda çok başarılı olmasa, kazanın daha kötü sonuçlar doğurması mümkündü. Bu kaza, reaktörlerin yanı sıra onlarla aynı odada bulunan atık yakıt havuzlarının da büyük risk oluşturduğunu gösterdi. Fukushima Dai-ichi'deki 4 numaralı reaktörün atık havuzundaki atık yakıtın zincirleme tepkimeye girerek atmosfere radyoaktif parçacıklar saçması olasılık dahilinde.

Nükleer enerji uzmanlarına göre Çernobil kazası bu güne kadar yaşanmış en kötü kaza ve bundan sonra böyle bir kaza yaşanması pek olası değil. Özellikle günümüzde faaliyette olan çoğu santral ve kurulmakta olan santraller, olası kazaların etkilerini reaktör bi-



Çernobil'de yaşananlar bir nükleer reaktörde olabilecek en kötü kaza. Kazaya yol açan olaylar ve reaktör tasarımı göz önünde bulundurulduğunda bu olaydan önemli dersler çıkartılıyor. Çernobil kazası özellikle güvenlik ve güvenilirlikle ilgili nelerin yapılmaması konusunda bizi aydınlatıyor. Çernobil kazası sonrasında reaktörle dış ortamı ayıran sağlam bir fiziksel engel olmadığından radyoaktif yakıtın neredeyse tamamı çevreye yayıldı. Yukarıda: Kazanın hemen sonrasında 4 no'lu reaktörün bulunduğu binadan geriye kalanlar görünüyor. Aşağıda: Günümüzde kazanın gerçekleştiği reaktör binası kalın betonla örtülmüş durumda.



nası içinde hapsedecek şekilde tasarlanmış durumda. Bu yine de kaza sırasında hiç bir radyoaktif serpinti olmayacağı anlamını taşıyor.

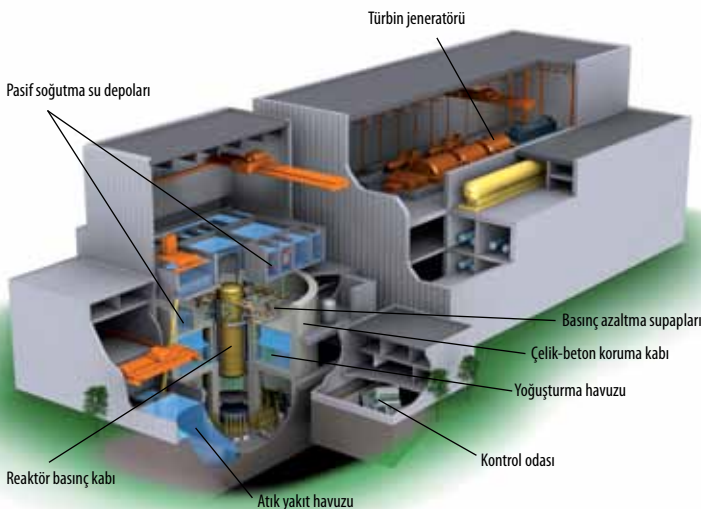
Fukushima Dai-ichi'den çıkarılacak dersler mutlaka olacaktır. Henüz içeride neler olup bittiği yetkililerce bile tam olarak anlaşılamamış durumda. Nükleer santral kazalarında, kazaların nedenlerinin anlaşılması için yapılan incelemeler uçak kazalarında olduğu gibi uzun sürüyor. Ancak, 1970'lerde yapılan bu tip reaktörlerin eksiklikleri zaten büyük ölçüde biliniyor, sonraki dönemlerde yapılan ve tasarlanan reaktörlerde bu eksiklikler büyük ölçüde giderildi.

## Yeni Kuşak Reaktörler ve Güvenlik

Yeni kuşak reaktörler bir kaza sırasında çevreleri için önemli bir tehdit oluşturmayacak şekilde tasarlanmış olsalar da, reaktörde meydana gelecek bir hasar çok ciddi maddi kayıplara yol açar. Çünkü bir santralin her bir ünitesinin maliyeti 2-2,5 milyar doları bulur ve bir kaza santralin tümüyle kapatılmasını gerektirebilir.

Gerek toplum sağlığı bakımından gerekse maddi yönden barındırdığı riskler düşünüldüğünde, nükleer güvenlik kurallarını belirleyen yetkili kurulların yanı sıra üreticiler de riske atamayacakları yatırımlarını korumak için güvenlik önlemlerini ön planda tutuyor. ABD'deki Nükleer Düzenleme Komisyonu'nun (NRC) güvenlik kurallarına göre, işletmede olan nükleer reaktörlerin kalplerinin hasar görme olasılığının, 10.000 çalışma yılında 1'den az olması gerekiyor. Çoğu işleticinin uyguladığı güvenlik önlemleri çerçevesinde kaza riski hali hazırda 100.000 çalışma yılında 1'den az. Güncel tasarımlar 1.000.000 çalışma yılında 1'den azı, üzerlerinde çalışılan dördüncü nesil tasarımlarsa 10.000.000 yılda 1'den azı hedefliyor.

General Electric / Hitachi'nin dünyanın en gelişmiş nükleer reaktörü olarak tanıttığı ESBWR kaynar su reaktörlü nükleer enerji santrali tasarımı. Reaktörü çevreleyen odalarda bulunan suyun bir bölümü yerçekimiyle, bir bölümü de pompalarla reaktöre akarak onu bir süre soğutuyor. Reaktörün içindeki buhar basıncının artmasını önlemek için su buharı yoğunlaştırma havuzunda yoğunlaştırılıyor. Bu önlemlere karşın basınç fazla yükselirse basınç azaltma süpürge tıpkı bir düdüklü tencerede olduğu gibi buharı dışarı vererek basıncı dengeliyor.



Nükleer santrallerde en temel acil güvenlik önlemlerinden biri, kontrol çubuklarının yakıt çubuklarının arasına indirilmesiyle tepkime hızının düşürülmesidir. Bu, reaktörün kapatılması anlamına gelse de reaktör belli düzeyde ısı üretmeye devam eder ve bunun sonucunda reaktörün sıcaklığı kısa süre içinde reaktörün erimesine yol açacak düzeye çıkabilir. Bu nedenle reaktörü soğutan sistemin her koşulda kesintisiz çalışmasını sağlamak birinci önceliklidir.

Fukushima Dai-ichi örneğinde görüldüğü gibi, bir reaktörde meydana gelebilecek kaza sonucunda dışarıdan müdahale çok zordur. Sistem görece kapalı bir sistem olduğundan ve yüksek radyasyon salımı söz konusu olabileceğinden, insan müdahalesi bir faciayı önlemede yetersiz kalabilir.

Yeni nesil santrallerde güvenlikle ilgili öne çıkan en önemli kriterlerden biri pasif güvenlik sistemleri. Ekonomik Kalkınma ve İşbirliği Örgütü'nün (OECD) Nükleer Enerji Ajansı'nın 2010 yılı raporuna göre, günümüzün üçüncü nesil reaktörlerinde bir kaza olması durumunda radyoaktif maddelerin çevreye saçılma olasılığı birinci nesil reaktörlerdekinin 1600'de 1'i kadar. Bu, eski reaktörlerin hali hazırda çok büyük risk taşıdığı anlamına gelmiyor, çünkü bu reaktörler de işletme ömürleri süresince güvenlik açısından geliştiriliyor. Günümüzde güvenlik önlemlerinin maliyeti, bir nükleer santralin toplam maliyetinin yaklaşık dörtte birini oluşturuyor.

Nükleer enerjide güvenlik çok yönlü olarak ele alınıyor. Her şeyden önce tasarımın ve kurulumun en üst kalitede olması gerekli. Güvenliğin temel prensipleri şöyle özetlenebilir: Ekipmanın kendisinden ya da insan hatalarından kaynaklanabilecek her türlü etkiyi soruna dönüşmeden giderebilmek, hataları izleyecek ve bildirecek mekanizmaları kurmak, herhangi bir kaza durumunda yakıtı koruyarak radyoaktif sızıntıya engel olacak çeşitli sistemleri bulundurmak, ciddi bir kalp hasarı durumunda bunun etkilerini santralin dışına çıkmayacak şekilde engellemek.

Kazaya hazırlık önlemleri, radyoaktif maddeyi içeren reaktör kalbi ile santralin dışı arasına konulan fiziksel engellerden ve yedekleriyle birlikte çeşitli güvenlik sistemlerinden oluşuyor. Bu sistemlerin de insan müdahalesine olabildiğince gerek duymayacak şekilde tasarlanması gerekiyor.

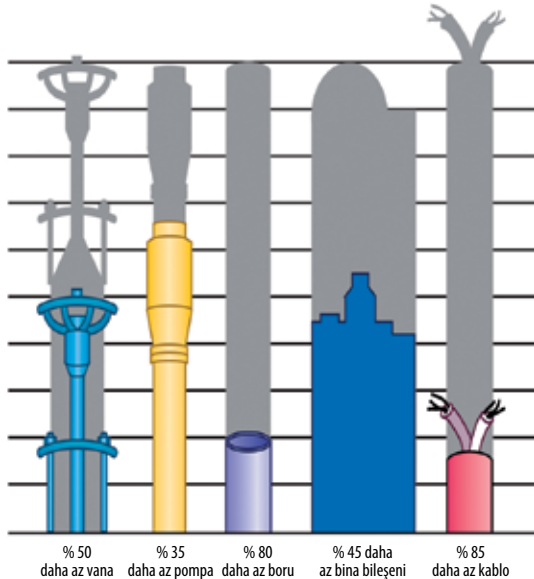
Tipik bir santralde yakıtla santralin çevresi arasında birçok fiziksel engel vardır. Öncelikle yakıt katı seramik topaklar halinde, yakıt çubuğu olarak adlandırılan zirkonyum alaşımı tüplerin içinde tutulur. Yakıt "yanarken" bu tüplerin bütünlüğü bozulmaz ve tepkimeler sırasında ortaya çıkan radyoak-

tif yan ürünler büyük ölçüde bu tüplerin içinde kalır. Yakıt çubukları duvar kalınlığı 30 cm'yi bulabilen, yüksek basınçlı bir çelik kabın içinde yer alır. En dıştaysa duvarları en az 1 metre kalınlıkta, güçlendirilmiş bir beton koruma kabuğu bulunur. Yakıt normal koşullar altında akışkan olmadığı için bu engeller ancak bir kaza durumunda işlevseldir.

Fiziksel engellerin durumu sürekli olarak kontrol edilir. Reaktörün içinde dolaşan soğutma suyunun radyoaktivitesi sürekli izlenerek yakıtın durumu kontrol edilir. Yüksek basınçlı soğutma suyunda bir kaçak olup olmadığı izlenir.

Fiziksel engeller dışında, bir nükleer reaktörde kontrol altında tutulması gereken üç temel şey nükleer tepkime hızı, yakıtın sıcaklığı ve radyoaktif maddelerin reaktör içinde kalıp kalmadığıdır. Geleneksel reaktör güvenlik sistemleri çoğunlukla "aktif sistemler"dir. Aktif sistemlerin kaza durumunda devreye girmesi için elektrikli ya da mekanik bileşenlere gereksinim duyulur. Bu sistemlerde aslında basınç azaltma supapları gibi pasif güvenlik önlemleri de bulunur. Ancak bu sistemler diğer sistemlerle birlikte çalışmadıklarında yani tek başlarına yetersiz kalırlar. Tam pasif güvenlik sistemleri ise mekanik ya da elektrikli sistemlere değil, ısı iletimi, kütleçekimi ya da yüksek sıcaklıklara dayanıklılık gibi fiziksel olgulara dayanır. Yeni kuşak santraller aktif güvenlik sistemlerinin yanı sıra pasif güvenlik sistemlerini yedek olarak bulundurur.

Reaktörlerde zincirleme tepkimelere yol açan nötronların soğurulması için kontrol çubukları kullanılır. Bunun yanı sıra bazı güvenlik unsurları maddenin doğasından kaynaklanır. Örneğin sıcaklık belli bir düzeyin üzerine çıkınca tepkimelerin verimliliği düşer. Bazı yeni reaktör tiplerinde güvenlik önlemi olarak bu özellikten yararlanır. Yine, sıcaklık



yükseldiğinde reaktör kalbinde su kabarcıkları oluşur ve bu da zincirleme tepkimeleri sağlayan nötronları dizginleyerek tepkime hızını düşürür.

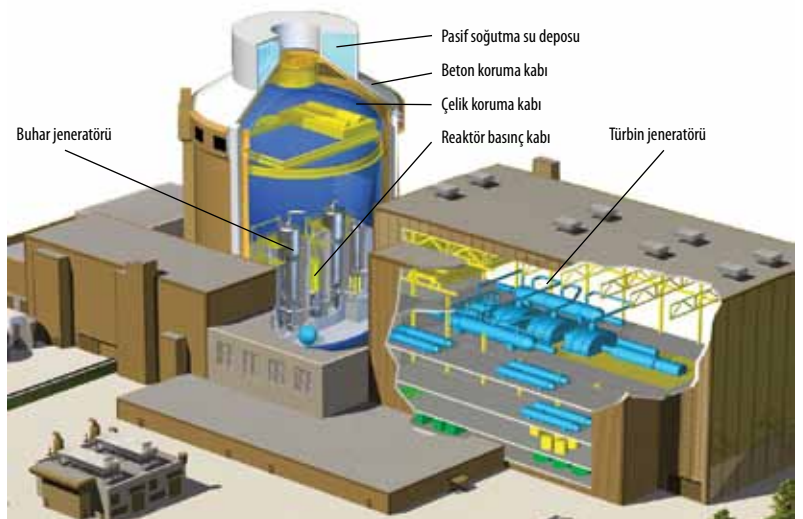
Günümüzde, nükleer enerji santrallerinde kullanılan teknoloji ortalama yirmi yıl öncesinin teknolojisidir. Kırk yıl önce kurulan ve çalışmakta olan santrallerin sayısı da az değil. Özellikle 1970'lerin başlarında yapılmış olan santraller çoğunlukla aktif soğutma sistemlerine sahip, yani elektriğe bağımlı. Daha sonra yapılmış olan santrallerse ek güvenlik önlemlerine karşın özellikle soğutmada yine ağırlıklı olarak aktif sistemlere bağımlı. Güncel tasarımlardaysa acil bir durumda yerçekiminden yararlanarak reaktörü soğutabilecek sistemler yer alıyor.



Tipik bir santralde yakıtla santralin çevresi arasında birçok fiziksel engel bulunur. Reaktörü çevreleyen çelik beton kapların yanı sıra, yakıtın kendisi de dışarı taşmasını engelleyecek şekilde katı seramik topaklar (yukarıda) halinde, yakıt çubuğu olarak adlandırılan zirkonyum alaşımı tüplerin (solda) içinde tutulur. Soğutmada herhangi bir sorun olmazsa yakıt "yanarken" bu tüplerin bütünlüğü bozulmaz ve tepkimeler sırasında ortaya çıkan radyoaktif yan ürünler büyük ölçüde bu tüplerin içinde kalır.

Westinghouse AP-1000 kaynar su reaktörü nükleer enerji santrali tasarımı (aşağıda sağda).

Yeni nesil santrallerdeki güvenlik önlemleri arasında daha az parça kullanımı da önemseniyor. Bu grafikte AP-1000'in önceki kuşak reaktörlere göre parça oranı karşılaştırılıyor. (aşağıda solda)





Günümüzde nükleer atıklar önemli bir sorun. Yüksek radyoaktiviteye sahip atıklar reaktörden çıktıktan sonra da uzun bir süre soğutulmaları gerektiğinden hemen paketlenip bir yere atılmıyor. Bunun yerine santralin içinde bulunan soğutma havuzlarında bekletiliyor. (yukarıda solda)

Düşük radyoaktiviteye sahip atıklarsa kurutulduktan sonra beton bloklar içine hapsedilip santral binasının yakınlarında depolanıyor. (yukarıda sağda)

Çakıl yataklı reaktörde yakıt yüksek sıcaklığa dayanıklı grafit içine hapsedilmiş uranyum ya da başka radyoaktif elementlerden oluşuyor.



Yeni tasarımlardan biri olan Westinghouse AP-1000'de reaktör odasının üzerinde özel bir su deposu var. Sistemin soğutmasında bir sorun olduğunda bu su reaktör bölgesine dolarak reaktörün soğutulmasını sağlıyor. Bu tasarım, bu ve sahip olduğu diğer pasif güvenlik önlemleriyle bir kaza sonrasında üç gün süresince hiçbir müdahale olmasa bile reaktörü koruyabiliyor. Bu reaktöre sahip iki santral Çin'de kurulma aşamasında. Reaktör tasarımı yapan başka şirketler de benzer güvenlik önlemlerine sahip tasarımlar geliştiriyor.

Güvenlik önlemleri arasında, olabildiğince az bileşen kullanımı da önem taşıyor. Tasarımcılar deprem gibi doğal afetlerden, yıpranmadan ya da terörist saldırılardan etkilenebilecek bina bileşenleri, borular, vanalar, kablolar, pompalar ve benzeri unsurları olabildiğince azaltma çabası içinde. Güncel tasarımlarda bu özellik en az diğer önlemler kadar öne çıkıyor.

Çoğu henüz tasarım aşamasında olan, bazıları da denenmiş ve su yerine sıvı metal gibi akışkanların kullanıldığı reaktörler de var. Bu reaktörlerin çoğu, bir kaza durumunda ısıyı konveksiyon yani ısıtışım yoluyla reaktörün dışına güvenli bir şekilde atabilecek yetenekte. Yine denemeleri yapılan çakıl yataklı reaktörde, yakıt yüksek sıcaklığa dayanıklı grafit içine hapsedilmiş uranyum ya da başka radyoaktif elementlerden oluşuyor. Reaktör sıvı yerine helyum, azot, karbon dioksit gibi tepkimeye girmeyen bir gazla soğutuluyor. Bu reaktörün en önemli özelliği yakıtın belli bir sıcaklıktan sonra nükleer tepkimeleri kendi kendine durdurması. Yani bu sistem karmaşık güvenlik önlemlerine gerek duymuyor. Çakıl yataklı reaktörün en önemli dezavantajı basınçlı su reaktörleriyle elde edilenin yaklaşık onda biri kadar enerji elde edebilmesi.



Yeni tasarımlar beraberinde bilinmeyenleri de getiriyor. Çoğu yeni tasarım, denenmiş tasarımlar üzerine inşa edilse de bir nükleer santralin karşı karşıya kalabileceği risklerin yol açabileceği hasarlar tam olarak öngörülemez. Japonya'da yaşanan olay bize bunu gösterdi. Beklenenden çok daha büyük bir deprem ve sonucunda da yine öngörülenden çok daha büyük bir tsunami meydana geldi.

Yeni tasarımlar pasif güvenlik sistemleriyle kurnalsal olarak eski santrallere göre çok daha güvenli görünse de yeni tasarımların özellikle doğal afetler karşısında denenmemiş olması başka soru işaretlerine yol açıyor.

Yine Japonya'daki Fukushima Daiichi kazası, nükleer atıklarla ilgili bir gerçeği de gündeme taşıdı. Fukushima Daiichi'deki dört numaralı reaktörün yanındaki atık havuzundaki yakıt, erime riskiyle karşı karşıya kaldı. Dışarıdan su desteğiyle buradaki atık yakıtın suyun dışında kalmaması sağlanmaya çalışılıyor.

Günümüzde nükleer atıklar önemli bir sorun. Yüksek etkinliğe sahip atıklar reaktörden çıktıktan sonra da uzun bir süre soğutulmaları gerektiğinden paketlenip bir yere atılmıyor. Bunun yerine santralin içinde bulunan soğutma havuzlarında bekletiliyor ve çoğu reaktörün atık havuzu neredeyse tamamen dolmuş durumda.

#### Kaynaklar

Uluslararası Nükleer Enerji Birliği (IAEA) Raporları (<http://www.world-nuclear.org/>)  
Altın, V., 4. Nesil Nükleer Santraller, *Yeni Ufuklara, Bilim ve Teknik*, Aralık 2007  
Altın, V., Nükleer Enerji, *Yeni Ufuklara, Bilim ve Teknik*, Ağustos 2004  
Lake, J.A., Bennett, R.G., Kotek, J.E., Next Generation Nuclear Power, *Scientific American*, Şubat 2009  
<http://www.scientificamerican.com/article.cfm?id=new-nuclear-designs-balance-safety-and-cost>  
<http://www.nature.com/news/2011/110322/full/471417a.html>