

# KÖMÜRLÜ SANTRALLARIN ÇEVREDE OLUŞTURDUĞU RADYASYON DOZU

## Nükleer Santrallerle Karşılaştırma



Taşkömürü ve linyit kömürü gibi yakıtların bileşiminde, çok az miktarda da olsa, Uranyum 238 ve Toryum 232'den türeyen Radyum 226, Polonyum 210 ve Kurşun 210 ve ayrıca Potasyum 40 gibi Doğal Radyoaktif maddeler, kömürün cinsine göre, daha az ya da daha çok vardır. Kömür, santralde yüksek sıcaklıkta yanarken, bunlar baca gazları ve kurumla birlikte hava ve yakın çevreye ulaşıyorlar. Rüzgar ve yağış durumu gibi hava şartlarına ve ayrıca santralin tam güçle ve kesintisiz çalışıp çalışmamasına göre, bu çeşit doğal radyoaktif maddeler de santral çevresindeki havada zaman zaman az, ya da çok bulunmakta ve etkin rüzgar yönündeki yörelerdeki toprakta ise gitgide zenginleşmektedir. Buralarda yetişen sebze, meyva, tahılın; ya da otlayan hayvanların etlerinin yenmesi, sütlerinin içilmesi yollarıyla da bu çeşit radyoaktif maddeler insana ulaşabiliyor.

Buradan, kömürlü santrallerin çevreye saldıkları çeşitli kimyasal maddelerin yanı sıra, radyoaktif madde saldıkları da görülüyor. Fosil yakıtlı santrallerden çevreye salınan bu çeşit radyoaktif maddeler, nükleer santrallerden salınan radyoaktif maddelerin cins ve miktarlarıyla karşılaştırıldığında ne derece önemlidir ve çevredeki halkın sağlığı için zararlı olabilir mi?

Önce şunu belirtmek gerekir ki nükleer santrallerden çevreye salınan radyoaktif maddeler içinde Radyum, Polonyum ve Kurşun gibi "ağır elementler" bulunmuyor. Nükleer enerjinin ortaya çıkışı sırasında, santraldaki yakıt elemanları içindeki Uranyum 235'in ikiye bölünmesi sonucu İyot 131, Kripton 87 ve Ksenon 133 gibi bir dizi "orta ağırlıkta" radyoaktif madde oluşuyor. Ayrıca Nükleer Santral atıkları içinde korozyon ürünleri denilen Krom 51, Kobalt 60, Mangan 54 gibi radyoaktif maddeler de bulunuyor. Bunlar ya nükleer santralin yakıt eleman çubuklarında ya da santraldeki kapalı devreler içinde kalmakta (Soğutma suyu ve atık gaz arıtma sistemleri devreleri gibi) ve bu nedenle santralin normal çalışması sırasında, ardı sıra sürdürülen arıtma ve filtreleme işlemleri sonrası, bacadan ancak çok az miktarda radyoaktif madde havaya ulaşıyor ve yetkili Kurumlarca izin verilen sınır değerlerin altında kalıyor.

Almanyada yapılan ölçüm, hesaplama ve karşılaştırmalar, kömürle çalışan santrallerin havaya saldıkları radyoaktif maddeler sonucu, nükleer santrallara oranla, santrallerin normal çalışması sırasında, etkin rüzgar yönündeki yerleşim bölgelerinde, daha yüksek radyasyon dozları oluşturabileceğini gösteriyor.

## Almanyada Yapılan Bir Bilimsel Çalışmanın Sonuçları<sup>1</sup>

Taşkömürlü ve linyit yakıtlı santrallerle, Nükleer santrallerden baca gazlarıyla çevreye salınan radyoaktif maddelerin cins ve miktarlarıyla, bunların çevrede oluşturabileceği radyasyon dozları ayrıntılı ölçüm ve hesaplamalarla etkin rüzgar yönündeki yerleşim yerleri için belirlenip karşılaştırılmış. Seçilen yerleşim yerlerindeki insanların orada yıl boyunca oturdukları ve tüm yiyeceklerini o çevreden sağladıkları varsayılmış. Ayrıca ölçümlerin yapıldığı Santrallerin tümünde çok katlı elektrostatik toz ya da parçacık filtreleri bulunuyor. Bu nedenle bu gibi filtrelerin bulunmadığı santrallerden daha çok radyoaktif madde yayılacağı ve çevrede daha yüksek dozların oluşacağı açık. Nükleer santral olarak 'Basıncılı Sulu bir Nükleer Santral' seçilmiş. Sonuçlarını karşılaştırabilmek için '1GW x Yıl' lık üretilen enerji başına santrallerin bacalarından salınan radyoaktif maddeler ve çevrede oluşabilecek dozlar hesaplanmıştır.

Sonuçlar özetle şöyle:

- Baca gazlarındaki kömür kurumu taneciklerindeki doğal radyoaktif maddelerinin özgül aktivitesi, yanmamış

kömürdekine oranla zenginleşiyor. Bu zenginleşme, kömürün yanma sıcaklığına, kömürün ve radyoizotopun cinsine göre 10 ile 200 kat arasında değişim gösteriyor.

- Taşkömürlü bir santral çevresi için bulunan etkin radyasyon dozu 7 µSv (mikro Sievert)<sup>2</sup>'e karşılık Nükleer Santral için 1 µSv (Herikisi için de 'IGW x Yıl' üretilen enerji başına) bulunmuş.

- Linyit kömürlü santraldan çevrede oluşabilecek radyasyon dozu, taşkömürlüden 5 kat kadar daha az

- Kaynamalı Sulu Nükleer santraldan çevrede oluşabilecek radyasyon dozu, Basınçlı suyla çalışandan 4 kat kadar daha çok

- Taş kömürlü santrallar için bulunan yukardaki 7 µSv'e karşılık, çevredeki doğal radyoaktif maddeler yoluyla oluşabilecek doz hesaplanmış ve bunun 2 µSv olduğu saptanmış

- Kömürlü santrallardan salınan radyoaktif maddelerden yayılan ışınlar vücuda yoğun olarak enerji aktaran alfa ışınlarından oluşurken, nükleer santrallardan yayılanlar vücutta daha az tutulan ve bu nedenle daha az etkili olan beta ve gama ışınlarından oluşuyor.

- Kömürlü santrallardan yayılan doğal ve ağır radyoaktif maddeler özellikle insanın kemiklerine yerleşip uzun süre etkili olabilirken, nükleer

santrallardan yayılan orta ağırlıktaki- ler içinde önemli olan İyot, Tiroid bezine yerleşiyor ve bir süre sonra vücuttan atılıyor.

Akla şu soru gelebilir: Taşkömürlü bir santralin çevresinde, nükleer santralinkine oranla 7 kat daha fazla radyasyon dozu oluşabildiğine göre, kömürlü santrallar çevresi, nükleer santrallardan daha tehlikeli değil midir ve buna göre bir önlem alınması gerekmez mi?

Aradaki bu büyük farka karşılık, gerek kömürlü ve gerekse nükleer yakıtlı santralların her ikisinde de, normal işletme sırasında çevreye yayılan radyoaktif madde miktarı ve bunun insanda oluşturabileceği radyasyon dozu miktarı sürekli olarak etkilenmekte olduğumuz ortalama 'doğal radyasyon' dozuyla karşılaştırıldığında son derece az. Örneğin santrallar 1 GW gücünde 1 yıl çalışıyorlarsa Taşkömürlü Santral için olan yukardaki 7 µSv'lik değer, 2400 µSv'lik ortalama yıllık doğal radyasyon dozunun<sup>3</sup> sadece binde üçüdür (7/2400 = 0,003). Nükleer santral için ise daha da küçük bir değer olan onbinde dört (1/2400=0,0004) bulunur.

Bu sonuçlardan, filtre sistemleri geliştirilmiş her iki cins santraldan da bacası gazları yoluyla çevrede oturanlara ulaşan radyoaktif maddelerin, doğal radyasyonun sürekli olarak insan vü-

cudunda oluşturduğu radyasyon dozuna önemli bir katkıda bulunmadığı görülmüyor ve ek bir risk beklenmiyor.

'Filtre sistemleri olmayan' taşkömürlü bir santrala, filtre sistemlerinin konulup geliştirilmesi, baca gazlarındaki kurum ve başka kimyasal maddelerin tutulması amacıyla zaten gerekecek. Yüksek kalitedeki çeşitli filtreler, baca gazlarında bulunan çok az miktardaki radyoaktif maddelerin tutulduğu parçacıkları da büyük ölçüde tutacağından ek koruyucu önlemlere gerek kalmayacak. Sadece bu gibi filtre sistemlerinin bulunmadığı taşkömürlü eski santrallar çevresinde, etkin rüzgar yönünde, yeni yerleşim yerleri kurulmaması düşünülebilir. Bu gibi santrallar çevresindeki toprak ve besinlerden örnekler alınıp, radyoaktivitelerinin belirli aralıklarla ölçülmesi ve o yöredeki insanlarda bu yolla oluşabilecek radyasyon dozlarının hesaplanması herhangi bir önleme gerek olup olmadığını gösterebilir.

Fizik Y.Müh.Dr. Yüksel Atakan  
ybatakan@gmail.com

Notlar:

- 1 Radyasyondan Korunma Komisyonunun (SSK) 02.07.1981 raporu
- 2 Sievert (Sv) Eşdeğer Doz Birimi olup Beta ve Gama ışınları için:  
1 Sievert = 1 Gray (Enerji Dozu Birimi) = 1 Joule / kg (Vücudun kg'ı başına, girici ışınların vücuttaki molekül ve atomlara 1 Joule'lük enerji aktarımı). Daha ayrıntılı bilgi için Tübitak Bilim Teknik Nisan 2006 Ekine bakılması.
- 3 Dünya ortalaması olarak doğal radyasyon dozu 2,4 mSv = 2400 µSv . Daha ayrıntılı bilgi için Tübitak Bilim Teknik Nisan 2006 Ekine bakılması

## Kol Saatlerindeki Radyoaktivite ve Sağlığa Etkisi

Gece görünen saatlerin gösterge ve kadrantlarındaki florasanlı maddelerin üzerine ışık düştüğünde, karanlıkta parladığını biliriz. Gece ışık olmayan yerlerde bunların görünmesi radyoaktif maddeli boyaların üstlerine sürülmüş olmasıyla sağlanıyor. 1960'lara kadar, radyoaktivitesi 150.000 Bq'e kadar varan Radyum kullanılmaktaydı. Saatin takıldığı koldaki deride aşırı olmamakla birlikte bir miktar radyasyon dozu oluşmaktaydı. Artık bugün radyum kullanılmıyor. Nedeni saati takan kişilerin alacağı dozdan çok, saatlerin yapıldığı fabrikalardaki işçilerin aldıkları yüksek dozdu.

Bugün saatlere sürülen boya içinde, Tritiyum (Hidrojenin 3 numaralı izotopu, H 3) kullanılmakta, bundan salınan çok düşük enerjide beta ışınları ise saatin altındaki metalde ve camında tutularak deriye ulaşmadığından, herhangi bir doz oluşmamakta. Ancak uçuculuğu yüksek olan trityumdan kaynaklanan 'trityum gazı' saatin çerçevesinden

sızarak deri yoluyla insan vücuduna girebiliyor. Bu yolla vücutta oluşabilecek yıllık eşdeğer doz 0,02 mSv'den az. Zaten küçük olan bu dozu daha da azaltmak için bugün, bir-



çok kol saatinde, içi trityum gazıyla doldurulmuş ve yüzeyi florasanlı maddeyle sıvanmış minicik kapalı cam kapsüller saatin sayılarını oluşturuyor. Bunun sonucu olarak vücutta oluşabilecek yıllık eşdeğer doz 0,01 mSv'den daha az. Doğal radyasyon nedeniyle oluşan yıllık ortalama doz ise, bunun çok üstünde olup 2,4 mSv.

Diğer yandan, bazı 'yarı iletken maddeler', bir süre görünür ışık aldıklarında, geceleri de uzun bir süre ışıldadıklarından, birçok saat yapıcısı bugün trityum yerine artık yarı iletken maddeleri kullanmakta.

Sonuç olarak, gece görünen kol saatleri yoluyla, vücutta belirgin bir radyasyon dozu oluşmayacağından sağlığa zararı olmayacağı açıktır.

Fizik Y.Müh.Dr. Yüksel Atakan  
ybatakan@gmail.com

\* 1 saniyede bozulan radyoaktif atom çekirdeği sayısı. Tübitak Bilim Teknik Nisan 2006 Ekine bkz.

# UÇAK YOLCULUĞUNDA ALINAN RADYASYON DOZU VE SAĞLIĞA ETKİSİ?



Özellikle tatil ve iş gezileri nedeniyle gitgide çok kişinin uçak yolculukları yapmakta olduğunu biliyoruz. 'Kozmik Işınlardan' etkisiyle uçaklardaki insanların vücutlarında oluşan radyasyon dozları ne büyüklükte ve bu dozların sağlığa etkileri ne ölçüde olabilir?

## Kozmik Işınlardan

'Kozmik ışınları' ilk kez fizikçiler laboratuvar çalışmaları sırasında, elektrik yüklü cisimlerin, elektrik yüklerini azar azar yitirmelerinin nedenini araştırdıkları buldular. Havayı iyonlayan<sup>1</sup> ve böylelikle havanın elektriksel iletkenliğini sağlayarak, elektrik yüklü cisimlerden elektriksel yük kaçaklarına yol açan bir şey, bir etken olmalıydı? Birçok bilim adamı önceleri, yerde, toprak ve kayalarda az miktarda bulunan doğal radyoaktif maddelerden yayılan ışınların havayı iyonladığını düşündü. En sonunda Avusturyalı fizikçi Victor Hess 1912 yılında bir balona binip, elektroskopunun göstergesini gözledi ve balonla yükseldiçe, elektriksel yükün gitgide azaldığını izledi. Öyleyse göklerden, uzaydan gizli bir şey gelip havayı iyonluyor ve elektroskoptaki yükler bu yolla gitgide azalıyor sonucuna varıldı ki bu gizli etkene 'kozmetik ışınlar' dendi.

1950'lerde fizikçiler 'kozmetik ışınları'nın, aslında adlarının tersine fotonlardan oluşan bir 'ışık' olmadığını, bunların ışık hızına varan çoğunlukla proton-

lardan ve az miktarda da daha ağır parçacıklardan oluşan sürekli bir 'iyon akımı' olduğunu belirlediler. Güneş sisteminin çok ötesinde uzayın derinliklerinden sürekli olarak dünyamıza gelmekte olan bu girici iyonların çok yüksek enerjilerini nereden aldıkları ise bugün bile bir sır. Bu yüksek enerjili kozmik ışınların, güneş sistemimize girdiğinde, güneşin yaydığı Güneş Rüzgarı denilen ve çoğunlukla elektronlardan oluşan dev akımın ürettiği manyetik alanın direncini yenmeleri gerekiyor. Ancak Güneş Rüzgarının şiddeti sabit olmayıp her 11 yılda bir değişim gösteriyor. Güneş rüzgarını yenip Dünyaya yaklaşmakta olan 'daha girici iyonları' bu kez Dünyanın manyetik alanının saptırmasının yanı sıra, geçmeleri gereken yoğun hava tabakaları molekülleri frenliyor (Dünyanın her cm<sup>2</sup> yüzeyi üstünde 1 kg hava var!).

Bu 'çok hızlı' ve dolayısıyla 'çok yüksek enerjili' iyonlar, havada yolları boyunca çarptıkları atomlardan, sayıları çığ gibi artan nötron, mezon ve daha birçok girici ikincil parçacıkları üretip atmosferde ve yeryüzünde bizleri etkiliyorlar.

## Uçaklarda Yolculuk

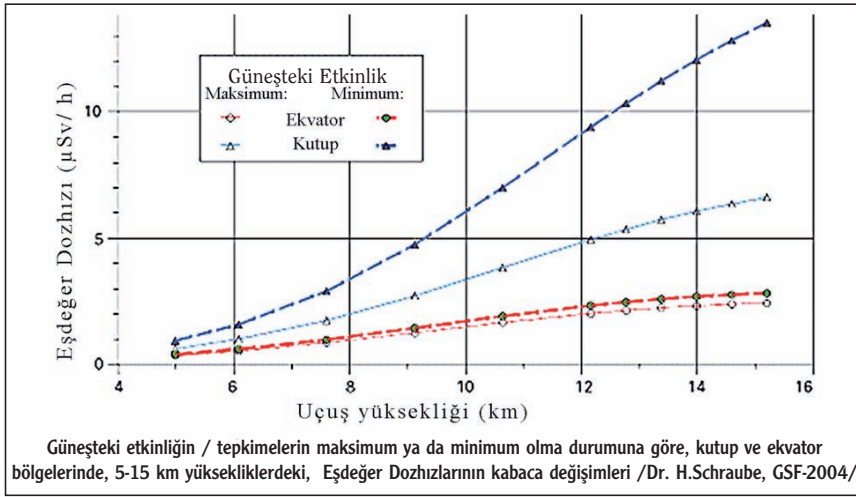
Birçok iş adamı yılda 240 saatten daha çok zamanını uçaklarda geçiriyor. Pilot ve uçak personeli ise ayda 80 saat kadar uçaklarda görev yapıyor ki bu da yılda 40 gün etmekte.

Yüksek enerjili Kozmik Işınlardan in-

san vücudunda oluşturduğu radyasyon dozunun büyüklüğü yukarıda açıklanan nedenlerle :

- Uçuş yüksekliğine
- Uçuş süresine
- Güneşteki Etkinliğe (aktiviteye)
- İzlenen uçuş yolunun coğrafi (geomanyetik) enlemine bağlı olarak değişiyor.

Deniz düzeyindeki bir yerleşim yerinde ortalama 0,3 mSv olan kozmik ışınlardan kaynaklanan radyasyon dozu<sup>2</sup>, 10.000 m yüksekliğinde yılda ortalama 44 mSv "e yükseliyor ki bu da saatte 0,005 mSv (= 5 mikro Sievert)'lik bir dozhızı demektir. Bu ise deniz düzeyindeki değerın 150 katına yakın. 12 000 m yükseklikte bu daha da büyüyor: 52 mSv/yıl ya da saatte 6 mikro Sievert. Radyasyon dozhızı, ekvatora doğru azalıyor, kuzeye doğru artan coğrafi enlemlerle birlikte artış gösteriyor ve 60° kuzey enleminde ekvatordakinin 2-3 katı olan en yüksek değerine ulaşıyor. Bunun nedeni kutuplardan ekvatora doğru Dünyanın manyetik alanının artması ve hızlı iyonlardan oluşan kozmik ışınların daha kuvvetli manyetik alanın etkisiyle daha çok saptırılarak iyonların ekvatora çok daha az ulaşmaları. Dozhızı, Güney yarımkürede ise kuzeye oranla 2-3 kat daha az. Çok seyrek olmasına rağmen güneşteki tepkimelerin aşırı değerlere ulaştığı zamanlarda radyasyon dozu iyice arttığı için radyasyon fizikçileri hatta böyle zamanlarda uçuş yasağı getirilmesi gerekti-



ğini ileri sürüyorlar. Örneğin güneşteki aktivitelerin çok aşırı olduğu 1957 de 12.000 m yükseklikte çok aşırı bir değer olan saatte 10 mSv ve 1989 da da saatte 0,1 mSv ölçüldüğünü burada belirtmeliyiz. İlginç olan her 11 yılda bir yinelenen güneş lekeleri aktiviteleri sırasında doz hızlarının, güneş rüzgarının oluşturduğu artan manyetik alanın zırhlama işlevi nedeniyle, normalin altında olduğunun gözlenmesi. Şekilde, Güneşteki tepkimelerin maksimum ve minimum olma durumlarına göre, kutup ve ekvator bölgelerinin 5-15 km yüksekliklerindeki doz hızlarının değişimleri görülüyor.

## Uçak Personelinin Alabileceği Doz ve Risk?

Yılda ayrı ayrı uçuşlarla toplanan ortalama 40 gün ve en çok 12.000 m yükseklikte uçan personel için yıllık ortalama doz (Bu yükseklikte 1 yıl boyunca etkili olabilecek 52 mSv'den gidilerek):

$$52 \text{ mSv} \times 40/365 = 5,7 \text{ mSv}$$

olabilir. Sadece kozmik ışınların etkisiyle alınan bu doz, deniz düzeyindeki yerel kaynaklar ile kozmik ışınların katkılarında oluşan toplam 2,4 mSv'lik doğal dozla karşılaştırıldığında uçak personelinin, doğal radyasyonla alınan dozun iki katından daha çoğunu almakta olduğu görülüyor. Aradaki fark büyük olmasına rağmen, bu pratikte birkaç röntgen filmiyle alınan doza eşdeğer ve vücutta bir hasara yol açma olasılığı son derece az. Risk anne karnında büyüme olan embriyo, ceninler için sözkonusu olabilir ve bunların özürlü doğma olasılığı var. Bu nedenle, uçak personelinin hamile olanların uçaklarda görevlendirilmesi ilgili yönetmeliklerle getirilen önlemlerle önleniyor.

## Çok Uçanların Etkilendiği Doz ve Risk?

Yılda toplam 240 saatlik (=10 gün) ve yukardaki yükseklikteki uçuşlar için yıllık ortalama doz:

$$52 \text{ mSv} \times 10/365 = 1,4 \text{ mSv} \text{ kadar.}$$

Bu değer, deniz düzeyindeki bir yerleşim yerindeki doğal radyasyon dozunun yarısından biraz çok ve bu nedenle çok uçanlarda, hamileler dışında, bir etki ve risk beklenmez. Anne karnındaki ceninlerde organ yapımı sürdüğünden ve bunların radyasyondan etkilenmeleri olasılığı büyük olduğundan hamile iş kadınlarının çok uçmamaları, özürlü doğumlara karşı bir önlem olarak, öneriliyor.

## Gezi Amaçlı Uçanların Alabileceği Doz ve Risk?

Yıllık toplam 50 saatlik (2 gün kadar) ve yukardaki koşullardaki uçuşlar için ortalama doz:  $52 \text{ mSv} \times 2/365 = 0,3 \text{ mSv}$  kadar. Bu değer, deniz düzeyindeki bir yerleşim yerindeki doğal radyasyon dozunun onda birinden biraz çok ve bu nedenle yılda birkaç saatlik uçak yolculukları için, hamilelerde bile, herhangi bir etki ve ek bir risk beklenmez. Tek bir röntgen filmi çektilmesinde alınan doz bundan çok.

Avrupa Birliği Yönetmeliklerine göre yılda 1 mSv'lik dozun aşılabileceği uçak personeli için, vücut dozunun 'doz ölçerleriyle' belirlenmesi ve değerlendirilip gerektiğinde önlemler alınması zorunlu. Uçak personeli de artık aynı nükleer reaktör personeli ya da röntgen aygıtlarıyla çalışan tıp doktorları gibi 'radyasyonlarla çalışanlar' grubuna giriyor ve denetleniyorlar. Radyasyonun vücuda etkileri konusunda eğitiliyorlar ve bu neden-

le onlar için de yılda 20 mSv'lik sınır değeri geçerli oluyor. AB Ülkelerinde uçak personelinin aldığı dozun ilgili yönetmelikler uygulanarak ölçülmesi ve uygun bilgisayar programlarıyla hesaplanıp değerlendirilerek yetkili Kurumlara bildirilmesi zorunlu. Örneğin Almanya'da 2004 yılında 30.000 uçak personelinin aldığı doz değerlendirilerek toplam topluluk (uçak personeli) dozu<sup>3</sup> olarak: 58 kişi x Sievert değeri bulunmuş. Buradan uçak personeli için kişi başına yıllık ortalama doz:

$$58 \text{ kişi} \times \text{Sievert} / 30.000 \text{ kişi} = 1,94 \text{ mSv}$$

Almanya'da uçak personeli, nükleer santrallerde çalışanlar dahil tüm iyonlayıcı ışınlarla uğraşan personel içinde, en çok doz alan grup. 2004'deki en yüksek doz değeri 5,7 mSv olmasına karşılık, bu değer yine de 20 mSv'lik üst sınır değerin çok altında kalıyor.

Diğer yandan Almanya'da Münih GSF-Enstitüsünde yapılan ve bu amaçla özel olarak geliştirilmiş EPCARD bilgisayar programıyla yapılan hesaplamalara göre 11 km yükseklikteki Avrupa içi uçuşlarda, uçuş başına bir kişinin aldığı radyasyon dozunun 0,010 mSv'in altında kaldığı<sup>4</sup>, Güney Afrika ve Güney Amerika için 0,040 mSv'den daha az ve Avrupa-ABD arası uçuşlar için ise 0,050 ile 0,080 mSv arasında olduğu belirlenmiş.

Sonuç olarak denilebilir ki, uçak yolculuklarında kozmik ışınlarla alınan doz ve bundan doğabilecek risk de, sürekli olarak almakta olduğumuz 'Doğal Radyasyon dozu' ve teknolojik yaşamın getirdiği bir dizi diğer radyasyon dozlarıyla (röntgen filmi çekimi sırasında alınan doz gibi) aynı çerçevede görülüp değerlendirilmeli, ilgili yönetmelikler uygulanmalı, makul olmayan aşırı önlemler alınmamalı.

Fizik Y.Müh.Dr. Yüksel Atakan  
ybatakan@gmail.com

Kaynaklar: [www.gsf.de/epcard](http://www.gsf.de/epcard)  
<http://europa.eu.int/comm/energy/nuclear/>

Notlar:

- 1 Atomlarla etkileşme sonucunda, ışınların atomların dış yörüngesinden elektron söküp, normal olarak elektriksiz olarak yüksüz bir atomu, elektriksiz yüklü duruma getirmesi ve böylelikle bir iyon çifti oluşması. Örneğin bir gama fotonunun havadaki bir azot atomunun dış yörüngesinden bir elektron sökmesi sonucu, serbest bir elektrona, geriye bir elektron eksik bir azot atomu (iyonu) kalmasıyla oluşan 'iyon çifti'
- 2 Sievert (Sv) Eşdeğer Doz Birimi olup Beta ve Gama ışınları için : 1 Sievert = 1 Gray (Enerji Dozu Birimi) = 1 Joule / kg (Vücutun kg'ı başına, girici ışınların vücuttaki molekül ve atomlara 1 Joule'luk enerji aktarımı). Yüksek enerjili Nötron ve Alfa için bu değer daha da yükseltilir. Daha ayrıntılı bilgi için TÜBİTAK Bilim Teknik Nisan 2006 Ekine bakılmalıdır.
- 3 Toplulukta kişi sayısı, her kişinin aldığı ortalama radyasyon dozunun çarpımı. Daha ayrıntılı bilgi için TÜBİTAK Bilim Teknik Nisan 2006 Ekine bkz.
- 4 Bu değer, Türkiye içi ve Avrupa'ya olan uçuşlar için de kabaca geçerlidir.