

ELEKTRON HIZLANDIRICILARININ GIDA IŞINLANMASI İÇİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Ş. TURHAN, H. KARABACAK, Y. EREL, S. OCAK, S. ÜNAL ve T. ZENGİN
Ankara Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi (ANAEM)
06100 Beşevler-ANKARA

Özet

Gıda ışınlanmasında iyonlaştırıcı radyasyon (gama, X-ışını, beta) kırmızı ve beyaz etlerin bozulmasını önlemek için mikro-organizmaların öldürülmesi; soğan, patates vb. gıdaların filizlenmesinin önlemesi; sebze ve meyvelerin tazeliğinin uzun süre korunması; hububatlardaki böcek, vb. haşerelerin öldürülmesi gibi alanlarda uzun süre kullanılmaktadır.

Gelişmiş ülkelerde gıdaların korunması amacı ile kullanılan kimyasal yöntemlere alternatif olan iyonlaştırıcı radyasyon ile ışınlama teknolojisi gittikçe yaygınlaşmaktadır. Türkiye’de ise henüz bu teknoloji çok fazla bilinmemekte ve kullanılmamaktadır. Bu amaç için sadece Co-60 kaynağının kullanıldığı iki ticarî ışınlama tesisi, birisi özel sektör olmak üzere, mevcuttur. Avrupa Birliği’ne girme sürecinde olan Türkiye’de gelecek yıllarda ihraç edilen gıdaların ışınlanması gerekebilecektir. Ayrıca ithal edilen gıdaların ışınlanıp ışınlanmadığının belirlenmesi ile ilgili çalışmalar önem kazanacaktır.

Bu çalışmada, gıda ışınlanmasında elektron hızlandırıcıları hem X-ışını açısından hem de hızlandırılmış elektronlar (β radyasyonu) açısından değerlendirilmiş ve ilgili parametreler tartışılmıştır. Ayrıca elektron hızlandırıcıları ile diğer radyasyon kaynakları (Co-60 ve Cs-137 gama kaynakları) karşılaştırılmıştır.

1. Giriş

İnsanların sağlıklı olarak hayatlarını devam ettirebilmeleri için çeşitli gıda maddelerini zamanında, yeterli ve dengeli bir şekilde almaları gerekmektedir. Ancak bazı gıda maddelerini her yerde veya her mevsim bulmak mümkün değildir. Bu sebepten dolayı ilk çağlardan günümüze kadar, gıda maddelerini bozmadan depolayarak bulunmadığı zamanlar tüketme ihtiyacı için klasik yöntemler (kurutma, tuzlama ve ısı ile muamele), soğutma, kimyasal işlemler (etilen dibromür, metil bromür, etilen oksit, fosfor, böcek ve haşere ilaçları, zehirli gazlar, vb.) ve iyonlaştırıcı radyasyon ile ışınlama gibi gıda koruma yöntemleri geliştirilmiştir ve daha etkin yöntem bulmak için çalışmaları devam etmektedir. Gıdanın veya gıda katkı maddelerinin yaygın bir şekilde kullanılan kimyasallar ile fumigasyonu sağlık, çevre ve güvenlik nedeni ile (EPA 1996) gelişmiş ülkelerde 2005’e kadar, gelişmekte olan ülkelerde 2015’e kadar tamamen kaldırılması öngörülmüştür.

Çürüme ve bozulmadan kaynaklanan kayıpların azaltılması ve gıda kaynaklı hastalıklara sebep olan organizma ve mikropların kontrolü kontrol için iyonlaştırıcı radyasyonun uygulanması ile ilgili çalışmalar ikinci Dünya savaşıdan sonra başlamıştır. Geçmiş yıllarda bir çok ülkede gıda ışınlama artan bir şekilde kabul görmüştür ve uygulanmıştır. Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Teşkilatı (FAO)/Dünya Sağlık Teşkilatı (WHO)/ Ulaslar arası Atom Enerji Ajansı (IAEA) uzman komitesinin “herhangi bir gıda ürününün ortalama 10 kGy’e kadar doz ile ışınlanmasının toksikolojik tehlikelere, mikrobiyolojik problemlere yol açmayacağını ve gıdaların besin değerinin kaybolmayacağını” açıklamalarından bu tarafa 40 yakın ülkede yaklaşık 100’den fazla ürünün ışınlanmasına onay verilmiştir (IAEA 1991, FAO 1997). Diğer ülkelerde ise bu konu ile ilgili mevzuatlar yoktur veya yasaklanmıştır.

Gıda ışınlanmasının diğer yöntemlere göre üstünlükleri; 1) ışınlama ile gıdada oluşan sıcaklık artışının ihmal edilecek kadar çok küçük olması (örnek olarak, 10 kGy ışınlamada sıcaklık artışı 2,5 °C), 2) büyük ebatlardaki gıda paketlerinin geniş hacimlerde

sürekli olarak ışınlamaya uygun olması, **3)** diğer yöntemlere, özellikle kimyasa yöntemere göre sağlık ve çevre açısından daha zararsız olması gibi sıralabilir.

Bu çalışmada, elektron hızlandırıcıları ile ilgili teknolojik ve ekonomik temel kriterler kısaca gözden geçirilmiş ve diğer radyasyon kaynakları ile karşılaştırılmıştır.

2. Gıda ışınlaması için kullanılan iyonlaştırıcı radyasyon kaynakları

Endüstriyel ölçekte gıda ışınlaması için kullanılan iyonlaştırıcı radyasyon (gama, X- ışınları, beta, vb.) kaynaklarını iki gruba ayırmak mümkündür: **1)** Yapay olarak elde edilen Co-60 (1.17 MeV ve 1.33 MeV enerjili gama yayınlayan, metal) ve Cs-137 (0.66 MeV enerjili gama yayınlayan, çözelti, CsCl) radyoizotop veya radyonüklid gama kaynakları (Çizelge 1). Bu radyoizotopların aktiviteleri gıda ışınlaması için birkaç MCi kadar olabildiği gibi araştırma geliştirme (ar-ge) çalışmaları için ise 1 kCi-50 kCi arasında değişmektedir. **2)** Yüksek enerjili elektronlar (beta radyasyonu) ve bu elektronların ani ivmelenmesinden dolayı ortaya çıkan frenleme X-ışınları kaynağı olan elektron hızlandırıcıları (Çizelge 1).

Değişik malzemelerin ve ürünlerin yüksek enerjili elektronlar ile ışınlama etkileri ilk olarak 1940'lı yıllarda araştırılmış ve endüstriyel ölçekteki ilk elektron hızlandırıcı tesisi, 1957'de Ethicon firması (ABD) tarafından ameliyet ipliklerinin sterilizasyonu için kurulmuştur. Daha sonra 1959'da Almanya'da 3 MeV'lik Van de Graaf elektrostatik ve 1960'da Riso (Danimarka)'da radyofrekanslı doğrusal hızlandırıcı tesisi hizmete sokulmuştur (Scharf 1986). Sonraki yıllarda yapay radyoizotopların üretilmesi ile endüstriyel ölçekte ilk gıda ışınlama tesisi, Co-60 gama kaynağının kullanıldığı gama ışınlama tesisidir.

Çizelge 1. Elektron hızlandırıcı ve radyoizotop gama kaynaklarının özellikleri.

Özellikler	Gama kaynakları	Elektron Hızlandırıcısı
Tesis sayısı	180	900
Kaynak gücü	Kurulu gücü=2.6 MW 14,85 kW/MCi (Co-60) 3,34 kW/MCi (Cs-137)	Kurulu güç=50 MW 10 kW- 200 kW Doz hızları yüksek;
Doz hızı	Düşük; 10 Gy/sn 5,26 yıl (Co-60)	10^3 - 10^{12} Gy/sn Yok
Yarılanma süresi	30,23 yıl (Cs-137) Düşük	Yüksek
İşlem kapasitesi	Derin, üstel olarak azalır	Yüzeysel
Nüfuz etme	Sabittir	Kontrol edilebilir
Çıkış enerjisi	Hayır	Evet
Radyasyonun kesilmesi	Muhtemel	Yok
Radyoaktif bulaşma	Sınır yok	Sınırlı, enerjiye bağlı
İşlanacak malzeme	Sınırlı	Bir çok imalatçı mevcut
Tedarik	Takviye edilmeli	Yıpranma ve bakım
Çalışma maliyeti	Yüksek	Düşük
İşnlama maliyeti	Zor	Daha kolay
Halkın güvenirliliği		

Hızlandırıcılar yüklü taneciklere kinetik enerji kazandırmak için yapılan imal edilen cihazlardır. Hızlandırıcıların çalışma ilkesi; elektrik alanının, yüklü taneciklere etki etmesi ile ve hızlandırma aralığındaki gerilim farkına eşit enerji vermesidir. Örnek olarak yüklü tanecik 1 V'luk bir gerilim farkından geçirildiğinde 1eV'luk enerji kazanır. Elektrik alanı, doğrudan yüksek gerilim elektrotlarından veya dolaylı olarak manyetik alanın değiştirilmesinden elde edilebilir. Farklı hızlandırıcı tipleri arasındaki en büyük fark, elektrik akımının nasıl elde edilebildiği ile ilgilidir. Elektrik alanının, doğrudan elde edildiği hızlandırıcılar, d.c elektrostatik hızlandırıcılar (Van de Graaf, Cockroft -Walton, vb.), dolaylı olarak elde edildiği hızlandırıcılar ise a.c doğrusal hızlandırıcılar (radyofrekanslı, mikrodalga, vb.) olarak isimlendirilir (Zimek and et al. 1993).

Yüksek enerjili elektronların, hedef atomlarının çekirdeğini saran elektron bulutuna etki ederek yörünge elektronlarının farklı enerji düzeyinden geçerken çekirdek ile Coulomb etkileşmesinden (saçılmalarından) dolayı anı olarak ivmelenmelerinden frenleme X-ışınları olarak da bilinen X-ışınları yayınlanır. X-ışınlarının şiddeti, elektron enerjisi ve hedefin atom numarası ile artar. Şiddetli X-ışınları elde etmek için hedef olarak genellikle tantal ve tungsten kullanılır. Radyoizotoplardan yayınlanan gama ışınlarının tersine, yüksek enerjili X-ışınlarını elektron demeti yönünde yoğunlaştırmak mümkündür ve elektronların geliş doğrultusundaki X-ışını şiddeti diğer doğrultulardaki şiddetin 10 katından daha büyüktür. X-ışınları için dönüşüm faktörü; 3 MeV- 5 MeV enerjili elektron hızlandırıcıları için 0,05-0,08 arasında, 10 MeV için 0,2-0,23 arasında değişmektedir.

Gıda ışınlaması için azami 10 MeV enerjili elektron hızlandırıcıları ve 5 MeV enerjili X-ışınlarının kullanıma izin verilmektedir. Çünkü bu değerlerin üzerindeki ışınlamalarda, malzeme radyoaktif olabilir.

Bu radyasyonların biyolojik etkileri aynıdır. Yüksek enerjili elektronlar (beta radyasyonu), ışınlanan malzeme atomlarının elektronları ile doğrudan etkileşerek ara ürünlerin (iyonlar, uyarılmış atom veya moleküller, serbest radikaller, vb.) oluşturdıkları için doğrudan iyonlaştırıcı radyasyon olarak bilinmektedir. Elektromanyetik radyasyon olan gama ve X-ışınları ise enerjilerine bağlı olarak ışınlanan malzeme ile fotoelektrik, Compton ve çift oluşumu gibi olaylar sonucunda çıkan elektronlar ile aynı ara ürünleri oluşturdıklarından, dolaylı iyonlaştırıcı radyasyon olarak isimlendirilir. Bu ara ürünler, karbonhidrat, protein, yağ, vitamin, enzim, pigment içeren her çeşit gıda bileşimi ile tepkimeye girerek yeni ara ürün bileşiklerin oluşumuna sebep olurlar. Gıdada bulunan mikro-organizmalar veya diğer gıda koruma yöntemlerine karşı dirençli olan bit, kurt, böcek, vb. gıda zararlıları radyasyonun doğrudan veya dolaylı etkisi sonucu, öldürülür veya gelişmeleri (yumurtaları, yavruları ve larvaları öldürülerek) durdurulur.

Gıda ışınlama tesisleri için uygun radyasyon kaynağının seçimi, teknolojik (ışınlama dozu ve doz hızı, nüfuz etme derinliği, işlem kapasitesi) ve ekonomik (yatırım ve işletme maliyeti) temel kriterlere bağlıdır.

3. Gıda ışınlama ile ilgili teknik kriterler

3.1. Işınlama dozu ve doz hızı

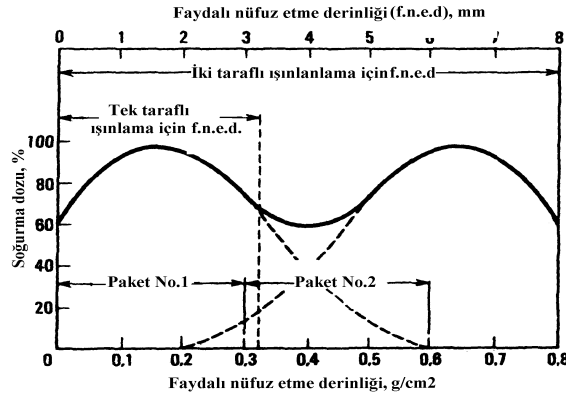
Ortalama doz; malzemenin soğurduğu enerji miktarının kütlesine bölümüdür. Doz birimi olarak Gy (J/kg) veya rad (100 erg/gr) kullanılmaktadır. Yüksek enerjili elektronlar ışınlanan malzeme ile hemen etkileştiğinden soğurulan doz, malzeme yüzeyinde en yüksek olur ve malzeme derinliğine doğru aniden düşer (Şekil 1). Işınlanan malzemedeki giriş dozu, birim alan başına gelen elektron sayısı (dolayısı ile elektron demet akımı) ile doğru orantılıdır. 1 mA'lık elektron akımının (10^{15} tane elektron) 1 cm²'lik alana düşmesi, yaklaşık olarak 10⁶ Gy/sn'lik doz hızına karşılık gelir. Doz hızları, elektrostatik hızlandırıcıları için 10³-10⁶ Gy/sn, a.c doğrusal hızlandırıcılarında ise 10¹⁰-10¹² Gy/sn arasında değişmektedir. Radyoizotop gama kaynaklarının doz hızı, 10 Gy/sn'dir (Maher 1980). Elektron hızlandırıcılarının doz hızlarının radyoizotop kaynaklara göre çok yüksek olması büyük bir üstünlüktür. Çizelge 2'de verilen gıda ışınlama uygulamaları (FAO/IAEA 1996, AAEA/FAO/IAEA 1998), saniye mertebesinde gerçekleştirilebilir.

3.2 Nüfuz etme derinliği

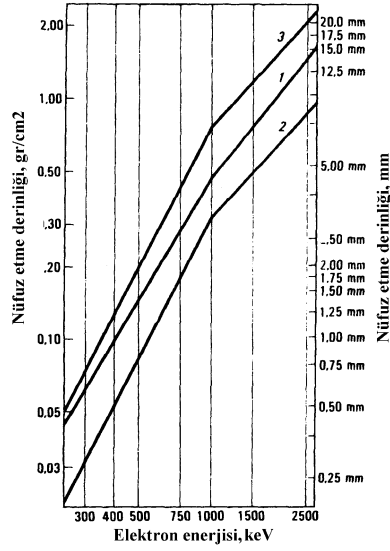
Elektronların malzeme içindeki nüfuz etme derinliği, elektron enerjisi ile doğru, ışınlanacak malzemenin yoğunluğu ile ters orantılıdır. Verilen bir elektron enerjisi için nüfuz etme derinliği, birim alan başına ışınlanacak malzemenin ağırlığı (gr/cm²) cinsinden verilir. Işınlama işlemlerinde, elektronların malzeme içinde tuzaklanmasını önlemek ve düzgün dağılımlı bir ışınlama yapabilmek için soğurulan dozun % 60'na karşılık gelen faydalı nüfuz etme derinliği kullanılır (Şekil 1). Işınlanacak malzemenin kalınlığı tek taraflı ışınlama için pratik olarak,

$$\frac{E^2(\text{MeV})}{3\rho} \quad E < 1 \text{ MeV} \quad \text{ve} \quad \frac{E(\text{MeV})}{3\rho} \quad E > 1 \text{ MeV}$$

ile verilir. Burada E; elektron enerjisi, ρ ; ışınlanacak malzemenin yoğunluğudur (gr/cm^3). Çift taraflı ışınlama için uygun taşıyıcı sistem tasarımı yapıldığında, malzeme kalınlığı 2,4 kat artmaktadır. Işınlanacak malzemenin kalınlığı veya gıda ambalaj ebatları nüfuz etme derinliğine (dolayısıyla elektron demetinin enerjisine) göre seçilir.



Şekil 1. Tek ve çift taraflı ışınlama için beta radyasyonun malzeme içindeki dağılımı.



Şekil 2. Nüfuz etme derinliğinin enerjiye göre değişimi: (1) toplam, (2) tektaraflı, (3) çift taraflı.

Çizelge 2. Gıda ışınlama uygulamaları.

İşnlama Dozu (kGy)	İşnlama Amacı	İşnlanacak Gıda ürünleri
Düşük Doz Düzeyi 0,02 - 0,2* 0,10 - 1,0 0,5 - 2,5*	• Depolanma sırasında filizlenme, çimlenme ve tomurcuklanmayı önlemek • Böceklenmeyi ve parazitleri önlemek • Raf ömrünü uzatmak	• Patates, soğan, sarımsak, kökler, vb. • Hububat, öğütülmüş hububat ürünleri, kabuklu yemişler, baklagiller, kurutulmuş sebze ve meyveler, kurutulmuş balık, vb. • Taze meyve ve sebzeler, vb.
Orta Doz Düzeyi 1,0 - 5,0* 3 - 7*	• Raf ömrünü uzatmak • Bazı patojenik mikro-organizmaları azaltmak, parazit kontrolü	• Taze deniz ürünleri, kırmızı et ürünleri, meyveler, vb. • Dondurulmuş deniz ürünleri, dondurulmuş kanatlı, kırmızı et ve ürünleri, vb.
Yüksek Doz Düzeyi 20 - 50	• Ticarî sterilizasyon	• Kanatlı, kırmızı et ve ürünleri, deniz ürünleri, kuru sebzeler, baharatlar, çeşniler, vb.

*6 Kasım 1999 tarih ve 23868 sayılı resmi gazetede yayınlanmış doz değerleri

Şekil 2'den görüleceği gibi, 10 MeV enerjili elektronlar, su gibi yoğunluğu 1 olan malzeme içinde azami 5,5 cm gidebilirler. Bu enerji değeri için faydalı nüfuz etme derinliği 3,3 cm ve çift taraflı işnlama için ise 8,3 cm'dir. Yoğunluğu 0,1 gr/cm³-0,2 gr/cm³ arasında olan tıbbî malzemelerin sterilizasyonu için çift taraflı nüfuz etme derinliği 40 cm - 80 cm arasında değişir. Elektron hızlandırıcılarının gama kaynaklarına göre en büyük dezavantajı, işnlanacak malzeme kalınlığının sınırlı olmasıdır. Elektron hızlandırıcıları, hububatların, baharatların, küçük boyutlu meyve ve sebzelerin, günlük tüketim için paketlenmiş kırmızı, kanatlı ve etlerin ve deniz ürünlerinin işnlanması için daha uygundur (Salimov and et al. 2000). Dünya Sağlık Teşkilatı, Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Teşkilatı ve Uluslar arası Atom Enerji Ajansı hububatlardaki böceklenmeyi azaltmak için elektron hızlandırıcılarının kullanımını kuvvetlice tavsiye etmektedirler (Getoff 1989). Büyük karton kutularda paketlenmiş sebze, meyve ve diğer gıdaların işnlanması için elektronların yerine X-ışınları kullanılabilir. Çünkü X-ışınlarının malzeme içindeki doz dağılımı, gama ışınlarında olduğu gibi üstel olarak azalır ve kalın malzemelerde kabul edilebilir düzgün doz dağılımı elde etmek için iki taraflı işnlamak gereklidir (Cleland 1997).

3.3. İşlem Kapasitesi

İşlem kapasitesi veya işlem hızı; kaynağın gücü veya kaynağın aktivitesi ile doğru orantılıdır ve

$$\frac{M}{T} = 3600 \times \frac{P}{D} \times f_1 \quad (\text{hızlandırıcı için}), \quad \frac{M}{T} = \frac{A}{D \times 18,7} \times f_1 \quad (\text{Co-60 için})$$

bağıntıları ile verilir. Burada, P; elektron demet gücü (kW), X-ışınları için $P_x = P \times \text{dönüşüm faktörü}$, A; kaynağın aktivitesi (Ci), D; işnlama dozu (kGy), M; işnlanacak malzemenin

kütlesi (kg), T; ıslınlama zamanı (saat), ve f_i; ıslınlama verimidir. ıslınlama verimi, malzemenin ıekliline, büyüklüğüne, ve ıslınlama tekniğıne (uygun taşıyıcı sistemlere) bağılıdır. Hızlandırılmış elektron demeti ile (bir manyetik alan ile saptırılarak) malzeme iki boyutta taranarak ıslınlanabildiğıinden hızlandırıcıların verimi, gama kaynaklarına göre büyüktür. Verim, elektron hızlandırıcıları için 0,30-0,60, radyoizotop gama kaynakları için 0,1-0,35 arasında değışmektedir. Elektron demet gücü 150 kW, ıslınlama dozu 0,25 kGy, ıslınlama verimi 0,55 alındığında, saatte 1190 ton hububat böcek kontrolü için silolardan alınıp, tarayıcının altından hızlı bir şekilde geçirilerek ıslınlanabilir. Elektron demet gücü 50 kW, ıslınlama verimi 0,35 ve ıslınlama dozu 2 kGy alındığında, saatte 31,5 ton taze, beyaz, kanatlı ve kırmızı et dezenfeksiyon için ıslınlanabilir. 1 MCi aktiviteli Co-60 gama kaynağı ile saatte 74,9 ton, Cs-137 gama kaynağı ile de 16,84 ton hububat böceklenmeyi önlemek için ıslınlanabilir. Elektron demeti çıkış gücü, gama kaynaklarının gücüne (Co-60 için 14,8 kW/MCi ve Cs-137 için 3,34 kW/MCi) göre daha yüksek olduğundan, elektron hızlandırıcıları, ıslınlama işlem kapasitesi açısından büyük üstünlüğe sahiptir.

4. Gıda ıslınlama ile ilgili ekonomik kriterler

4.1 Yatırım Maliyeti

Yatırım maliyetlerini, tesisin kurulacağı arsa, altyapı, bina, cihaz (aksesuarları) vb. giderler oluşturur. Bu çalışmada, yatırım maliyeti olarak sadece elektron hızlandırıcı cihazının maliyeti göz önüne alınmıştır. Gıda ıslınlama tesisi için yatırım ve işletme maliyeti, ıslınlama işlemine ve elektron hızlandırıcı özelliklerine bağılıdır. Elektron hızlandırıcısı ile ilgili teknik kriterler (tipi, enerjisi ve gücü), ıslınlama işleminin özelliğıne göre seçilir. Co-60 ve Cs-137 radyoizotop kaynaklarının tedarikçileri az sayıda olmasına rağmen farklı tipte, enerjide ve güçte elektron hızlandırıcıları değışik firmalar (düşük enerjili, 0,1 MeV-0,5 MeV: ESI ENERGY SCIENCE INC., RPC INDUSTRIES, POLYMER PHYSICS, NISSIN HIGH VOLTAGE CO. LTD., vb., orta enerjili, 0,5 MeV-5 MeV: NISSIN HIGH VOLTAGE, VIVIRAD HIGH VOLTAGE, RADIATION DYNAMICS INC., vb., yüksek enerjili, 5 MeV-15 MeV: ION BEAM APPLICATION, AECL, vb.) tarafından imal edilmektedir (Zimek 1993). Bu hızlandırıcılardan bazılarının maliyetleri Çizelge 4'de verilmiştir.

Elektron hızlandırıcı tesisleri, gama ıslınlama tesislerine benzerlik gösterirler. Ancak cihaz kapatıldığında, radyasyon tehlikesi olmadığından dolayı bakım ve onarım için gama tesislerindeki gibi kaynağı koymak için havuza (yükleme ve herhangi bir arıza durumunda) gerek yoktur. ıslınlama süresince çıkan frenleme X-ışınlarından çalışanları korumak için kalın beton duvarlar (gama tesislerine göre daha ince) ile zırhlama yapılır. ıslınlanacak gıdalar, ambalajlı olarak, taşıyıcı sistem kullanılarak ıslınlama bölümüne sokulur ve elektron demetinin çıktığı tarayıcının (dikey veya yatay konumda olabilir) altından hızlı bir şekilde geçirildikten sonra çıkarılır. Çift taraflı ıslınlamaya uygun taşıyıcı sistemler de kullanılabilir. Elektron demet enerjisi 10 MeV olan IMPELA tipindeki hızlandırıcının farklı elektron demet güçleri ve bu güçlere karşılık gelen Co-60 gama kaynağı için yatırım maliyetleri Çizelge 5'de verilmiştir. Görüleceğı gibi 2 MCi'lük aktiviteye karşılık gelen (Co-60 için) 30 kW kaynak gücünde her ikisinin de yatırım maliyetleri hemen hemen aynıdır. Fakat elektron hızlandırıcıların yatırım maliyeti, daha yüksek kaynak gücü söz konusu olduğunda, Co-60 gama kaynağına göre daha düşüktür. Radyoizotop kaynakların gücü arttırıldığında, kaynak maliyetinin dışında zırhlama ve taşıyıcı sistem (daha geniş ve hızlı olması) için ilâve harcama gerecektir.

4.2 İşletme giderleri

İşletme giderlerini, personel maaşları, bakım-onarım, elektrik, su, vergi, sigorta, vb. giderler oluşturur. Bu çalışmada, elektron hızlandırıcı ile Co-60 gama kaynağını karşılaştırmak amacı ile işletme gideri olarak elektron hızlandırıcıları için elektrik harcamaları, Co-60 için de sadece takviye edilmesi gereken aktivite maliyeti göz önüne alınmıştır. Diğer giderler, her iki tesis içinde hemen hemen aynıdır. Farklı kaynak güçleri için işletme giderleri Çizelge 5'de verilmiştir. Elektron hızlandırıcılarının işletme giderleri,

yatırım maliyetinde olduğu gibi, daha yüksek kaynak gücü için gama kaynaklarına göre daha düşüktür.

Çizelge 3. Farklı tipteki hızlandırıcı maliyetleri.

İmalatçı Firma/Hızlandırıcı tipi	Enerji (MeV)	Akım (mA)	Güç (kW)	Maliyet (ABD \$)
VIVIRAD/Yalıtılmış Çekirdekli Transformatör (YÇT)	2,5	40	100	2.000.000
RADIATION DYNAMICS/dinamitron	3,0 5,0	33 30	100 150	2.100.000 3.600.000
AECL/IMPELA mikrodalga doğrusal hızlandırıcı	10	2,5 5 7,5 10 12,5 15	25 50 75 100 125 150	3.550.000 3.800.000 4.050.000 4.300.000 4.550.000 4.800.000

Çizelge 4. Elektron demet enerjisi 10 MeV olan elektron hızlandırıcısının farklı elektron demet güçleri ve bu güçlere eş değer Co-60 kaynağı için yatırım maliyeti.

Kaynağın Gücü (Kw)	Co-60 Radyoizotop Kaynağının Aktivitesi (MCi)	Co-60 Gama Kaynağının Maliyeti* (ABD \$)	Elektron Hızlandırıcısının Maliyeti (ABD \$)	Elde edilen X- ışının Gücü (kW)/ Maliyeti** (ABD \$)
15	1	2.000.000	3.315.000	3/3.365.000
25	1,69	3.030.000	3.550.000	5/3.600.000
50	3,37	5.560.000	3.800.000	10/3.850.000
75	5,06	8.090.000	4.050.000	15/4.550.000
100	6,75	10.620.000	4.300.000	20/4.350.000
125	8,43	13.150.000	4.550.000	25/4.600.000
150	10,12	15.680.000	4.800.000	30/4.800.000

*Maliyet, 1,50 \$/Ci ile hesaplanmış ve gama kaynağı tesisinin tasarımı ve lisanslanması elektron hızlandırıcı tesisinden farklı olduğundan sabit gider olarak 500.000 \$ ilâve edilmiştir (Cleland 1996).

** Elektron/X-ışını dönüşüm hedefi düzeneği için hızlandırıcı maliyetine 50.000 \$ ilâve edilmiştir ve X-ışını gücünün hesabında dönüşüm faktörü 0,2 alınmıştır.

Çizelge 5. Elektron demet enerjisi 10 MeV olan elektron hızlandırıcısının farklı elektron demet güçlerine ve bu güçlere eş değer Co-60 kaynağı için işletme giderleri.

Kaynağın Gücü	Co-60 Radyoizotop Kaynağının Aktivitesi	Co-60 Gama Kaynağının Takviye Edilen Aktivite Maliyeti*	Elektron Hızlandırıcısının Elektik Enerjisi* ** sabit bakım gideri***
(kW)	(MCi)	(ABD \$/saat)	(ABD \$/saat)
15	1	21,46	34
25	1,69	36,26	40
50	3,37	72,32	55
75	5,06	108,58	70
100	6,75	144,84	85
125	8,43	180,89	100
150	10,12	217,16	115

*Co-60 radyoizotopunun yarılanma süresi 5,26 yıl olduğundan her yıl aktivitesinin %12,4'ünü kaybeder dolayısı ile kaynağın gücünü aynı düzeyde tutabilmek için her yıl bu miktar kadar takviye edilmesi gerekmektedir.

**Harcanan elektrik gücü, elektron demeti giriş gücünün 6 katı ve elektrik enerji maliyeti 0,1 \$/kWsaat olarak kabul edilmiştir.

***Onarım-bakım gideri, ışınlama işlemine ve tesisin yıllık çalışma programına (2000 saat/yıl, 3000 saat/yıl, 4000 saat/yıl, vb.) göre değişmektedir (Cleland 1997). Bu çalışmada, ortalama olarak 25 \$/saat alınmıştır.

5. Sonuç ve Tartışma

Son yıllarda daha güçlü cihazlar imal edildiğinden, elektron hızlandırıcıları hem teknik hemde ekonomik açıdan gıda ışınlama tesislerinde yaygın olarak kullanılan radyoizotop kaynaklar ile rekabet edebilir duruma gelmiştir. Bu çalışmadaki değerlendirmeden de anlaşılacağı gibi gıda ışınlanmasında elektron hızlandırıcılarının kullanımı, ümit vadeden bir çözümdür ve düşük yoğunluklu, geniş hacimli ürünler (hububat, baharat, çeşniler, vb.) için teknik ve ekonomik olarak radyoizotop kaynaklara göre daha caziptir. En büyük üstünlüklerinden birisi, halkın gıda ışınlanmasını kabullenebilmesi açısından, radyoaktif olmaması, cihaz kapatıldığında radyasyonun kesilmesi ve herhangi bir şekilde radyoaktif atığın bulunmamasıdır. İşletmede ortaya çıkabilecek problem ise kararlı bir elektrik akımının sağlanması ve yedek parça teminidir.

Ülkemizde, 1967 yılında hububatlarda böceklenmeyi önlemek amacı ile endüstriyel ölçekte bir ışınlama tesisi (100 kCi Co-60, işlem kapasitesi, 30-50 ton/saat) Birleşmiş Milletler Gelişme Programı destekli anlaşma çerçevesinde İskenderun'da kurulmuştur. Ancak radyoaktif olmasına karşı gösterilen tepkiler sebebi ile 1968 yılında sökülerek Ülke dışına taşınmıştır. Bu girişimden uzun yıllar sonra 1993'te Türkiye Atom Enerjisi Kurumu (TAEK) tarafından, özel sektörü cesaretlendirmek ve yönlendirmek amacı ile sterilizasyon, gıda ışınlama (ihraç edilen baharatlar), plastik malzemelerin modifikasyonu (özellikle plastik boruların ışınlanarak mekanik, ısı ve kimyasal etkilere karşı daha dirençli olabilmeleri), vb. için standartlara uygun gama ışınlama tesisi (1MCi kapasiteli, başlangıç aktivitesi; 100 kCi Co-60) Sarayköy'de (Ankara) kurulmuştur. Bir kaç yıl sonra benzer bir tesis, GAMMA-PAK firması tarafından (başlangıç aktivitesi: 500 kCi Co-60) Çerkezköyde (Çorlu) ticari olarak faaliyete geçirilmiştir. Bunun yanında ülkemizde, hastanelerde kanser tedavisinde kullanılan elektron hızlandırıcıları hariç gerek gıda ışınlanmasında gerekse diğer radyasyon uygulamalarında (ar-ge dahil) kullanılan herhangi bir hızlandırıcı mevcut değildir. Bu konudaki açığı kapatmak için yine TAEK tarafından, ışınlanmış gıdaların tesbiti, yüzey sterilizasyonu, vb. ar-ge çalışmalarının yanında elektron hızlandırıcılarını özel sektöre tanıtmaya amacına yönelik (laboratuvar veya küçük pilot ölçekli) olarak çok amaçlı kullanılabilecek

elektron hızlandırıcısı ünitesi (enerjisi 0,5 MeV, akımı 20 mA ve gücü 10 kW olan YÇT tipinde) ANAEM’de kurulacaktır.

6. Kaynaklar

- AAEA/FAO/IAEA 1998. Regional Workshop on Present Status and Guidelines for Preparing Harmonized Legislation on Food Irradiation in the Near East, Tunis, Tunisia, October 12-16.
- Cleland, M. R. 1996. Electron Beam Processing of Food Products, Food Irradiation Workshop, Guelph, Ontario, Canada, August 20.
- Cleland, M. R. 1997. Disinfestation of Agricultural Commodities with High Energy Electrons and X-rays, and Accelerators Capabilities for Disinfecting Boxed Frozen Hamburger with High Energy Electrons, Irradiation as a Treatment for Solving Phytosanitary Issues, Tampa, Florida, August 5-8.
- EPA 1996. Revocation of Pesticide Food Additive Regulations; Final Rule, Federal Register, vol. 61, 57, 11994-11999, March 22.
- FAO/IAEA 1996. Workshop on Guidelines for Preparing and Adapting Harmonized Legislation on Food Irradiation, Accra, Ghana, October 21-25.
- FAO 1997. Irradiation in the Production, Processing and Handling of Food, Final Rule. 21, Federal Register, vol. 62, 232, 64107-64121, December 3.
- Getoff, N., 1989. Electron Induced Disinfestation of Grain, Radiation Physics and Chemistry, vol. 34, 6, 995-998.
- IAEA 1991. International Consultative Group on Food Irradiation, Facts About Food Irradiation, Vienna.
- Maher, W. J. 1980. The Application of Electron Beam Equipment for the Sterilization of Medical Devices, Radiation Physics and Chemistry, vol. 15, 99-106.
- Salimov, R. A., et al. 2000. The Use of Electron Accelerators for Radiayion Disinfestation of Grain, Radiation Physics and Chemistry, 57, 625-627.
- Scharf, W. 1986. Particle Accelerators and Their Uses, Harwood Academic Publishers.
- Zimek, Z., et al. 1993. Present Tendencies in Contruction of Industrial Electron Accelerators Applied in radiation Processing, Nukleonika, vol. 38, 2, 3-20.