

GIDALARDA RADYASYON UYGULAMALARININ MİKROORGANİZMALAR ÜZERİNE ETKİLERİ

THE EFFECTS OF RADIATION PROCESSING ON MICROORGANISMS IN FOODS

Hilal B. D. HALKMAN*, Pölln K. YÜCEL

TAEK Ankara Nükleer Tarım ve Hayvancılık Araştırma Merkezi, Ankara

ÖZET: Işınlama; kontrollü iyonlaştırıcı radyasyon kaynağı kullanılarak tıp, biyoloji, tarım, endüstriyel kimya, gıda endüstrisi vb. pek çok alanda uygulanan bir prosestir. Gıda endüstrisinde bu proses ile gıdaların raf ömrü uzatılır, gıda kayıpları azaltılır, gıdanın mikrobiyolojik güvenilirliği geliştirilir ve buna bağlı olarak çeşitli inhibitörlerin (katkı maddeleri, fumigantlar vb.) kullanımı azaltılır. Bu derlemede ağırlıklı olarak gıdalarda ışınlama işleminin mikroorganizmalar üzerindeki etkisi anlatılmıştır.

Anahtar Kelimeler: İyonlaştırıcı radyasyon, ışınlama, mikroorganizmalar, gıda

ABSTRACT: Food irradiation is a process by which food is exposed to a controlled source of ionizing radiation to be applied to medicine, biology, industrial chemistry, agriculture and food industry. In food industry, use of irradiation prolongs the shelf life of foods, reduces the food losses, improves the microbiological safety of food and reduces the use of various inhibitors (such as additives and fumigants). In this review, mainly the effects of irradiation on microorganisms in foods were explained.

Keywords: Ionizing radiation, irradiation, microorganisms, food

GİRİŞ

Pierre ve Marie Curie ile Antoine Henri Becquerel'in 1800'lerin sonu ile 1900'lerin başındaki çalışmaları ile başlayan radyasyon uygulamaları günümüzde çok farklı alanlarda barışçıl amaçlarla kullanılmaktadır. Bunlar arasında sağlık ve enerji üretimi başta olmak üzere, kimya endüstrisinde polimerleştirme reaksiyonları, tarımda böcek kontrolü, filizlenmenin önlenmesi, kesme çiçekte raf ömrünün uzatılması, lazer teknolojileri, gıda endüstrisinde mikroorganizma kontrolü ilk akla gelenler arasındadır. İlk özel gıda ışınlama çalışması 1921'de X ışınlarıyla domuz etindeki *Trichinella spiralis*'in eliminasyonu konusunda yapılan araştırma ile başlamıştır (Moy 1992, Anonymous 2004, Siyakuş 2004).

Radyasyon Prosesleri gıda endüstrisinde basit olarak mikrodalga fırın ile yemek ısıtmadan, başta baharat olmak üzere çeşitli gıdaların mikroorganizmalardan arındırılmasına kadar uzanan çok geniş bir kullanım alanı vardır. Işınlama gıda endüstrisinde sterilizasyon amacı ile değil, genellikle mikroorganizma yükünü indirgeyici amaçlı olarak kullanılır ve bu kullanıma bağlı olarak "soğuk pastörizasyon" olarak da anılır (Abbas 2002, Çetinkaya 2003, Anonymous 2005).

İŞINLAMA TEKNOLOJİLERİ

Radyasyon, iyonlaştırıcı ve iyonlaştırıcı olmayan olmak üzere iki çeşittir. İyonlaştırıcı olmayan radyasyonun yaydığı enerji 30-34 eV'dan daha azdır ve düşük enerjili radyasyon olarak tanımlanır. İyonlaştırıcı radyasyon ise 30-34 eV'dan daha yüksek enerjiye sahip olan yüksek enerjili radyasyondur. Düşük enerjili radyas-

* hdogan@taek.gov.tr

yon türleri arasında uzun ve kısa radyo dalgaları, radar, mikrodalga, kızılötesi, lazer, görülebilir ışık ve UV, yüksek enerjili radyasyon arasında X ışınları ve kozmik ışınlar yer alır. İyonize radyasyon endüstride radyoaktif materyaller ve jeneratörler olmak üzere iki esas kaynaktan elde edilir (Anonymous 2004, Juri ve Ali 2005).

Radyasyon perosesleri, UV radyasyonu, iyonlaştırıcı radyasyon ve mikrodalga olmak üzere yaygın olarak 3 şekilde uygulanmaktadır. İyonlaştırıcı radyasyonda ^{60}Co ya da ^{137}Cs gibi radyonüklitlerden elde edilen gama ışınları, elektron hızlandırıcılarından elde edilen yüksek enerji elektronları (elektron demetleri) ve X ışınları kullanılmaktadır (Anonymous 2004, Aydın 2004).

Endüstriyel amaçlarla kurulan gama ışınlama tesislerinde ^{60}Co kaynağı kullanımı yaygındır. IV. sınıf olarak tanımlanan ışınlayıcılar, kullanılmadıkları zamanlarda su ile doldurulmuş depolama havuzunda bulunan, ışınlama sırasında sudan çıkarılan ve her iki konumda da kapalı kaynakların içinde bulunduğu ışınlama odasına insan girişlerinin kontrol altında tutulduğu tesislerdir. ^{60}Co radyoizotopu reaktörlerde ^{59}Co izotopunun nötron ile bombardıman edilmesi sonucunda elde edilir. Radyoaktif olan ^{60}Co , β ve bunu takip eden 1,17 MeV ve 1,33 MeV enerjili (toplam 2,5 MeV) iki adet gama radyasyonu yayar ve ^{60}Ni kararlı izotopuna dönüşür. Ürünlerin ışınlanmasında bu gama radyasyonları kullanılır (Ünal 2003).

İşinlamanın tarihesi 20. yüzyılda üç bölüm halinde incelenmektedir. Yüzyılın ilk yarısında radyasyon proseslerinde öncülük yapan çalışmalar gerçekleştirilmiştir. 1950-1970 yılları arasında yeni radyasyon kaynaklarının yardımı ile teknolojik çalışmalar yapılmıştır. 1970' li yıllardan sonra ise çalışmalar ulusal ve uluslararası yasal düzenlemeler ve işinlamanın ticari uygulamaları üzerinde yoğunlaşmıştır (Diehl 2001, Anonymous 2004).

GIDA İŞINLAMA

Gıdalar ile insanlara geçen patojenlerin sayısı 200 kadar iken, bunlardan insan sağlığını önemli ölçüde tehdit edenlerin sayısı, başta *Salmonella* spp., *Campylobacter jejuni*, *Listeria monocytogenes* ve *E. coli* O157:H7 olmak üzere sadece 8-10 kadardır. Buna karşın, bu hastalıkların bir yandan ekonomik kayıp olarak görülmesi, öte yandan ve asıl önemli olarak bunların bireysel ya da salgınlar sonucu ölümlere neden olması gıda kaynaklı patojenler üzerinde yoğun indirgeme ve eliminasyon programlarının uygulanmasına yol açmıştır. HACCP, GMP, GAP vb. uygulamalar öncelikle insan sağlığını güvenceye alan kalite yaklaşımlarıdır (Topal 1996, Tunail 2000).

Özellikle hayvan kaynaklı spor oluşturmeyen patojenik bakterilerle gıdaların kontaminasyonu insan sağlığı açısından dünyanın her yerinde ciddi sorunlar yaratmakta, ölümlerle sonuçlanmakta veya tıbbi masraflar ile ilişkili ekonomik kayıplara ve prodüktivitede kayıplara neden olmaktadır. ABD' de yılda 76 milyon gıda kaynaklı hastalık ve bunun sonucunda 5.000 ölüm tahmin edilmektedir. Yıllık tıbbi masraflar ve verimlilikte oluşan kayıp ise 6,6 milyar dolar ve 37,1 milyar dolar arasında değişmektedir. Gıda kaynaklı hastalık vakalarında hastalardan sıklıkla bakteriyel etken olarak *Listeria*, *Salmonella* ve *Campylobacter* izole edilmiştir (Mead vd. 1999, Etzel 2001).

Gıdaların mikroorganizmalardan korunması için başta ısıtma, kurutma, soğutma, kimyasal koruyucular ilavesi vb. gibi geleneksel yöntemler yanında yüksek basınç teknolojileri, vurgulu elektrik vb. gibi yeni teknolojiler üzerinde yoğun çalışmalar yapılmakta, bunlar engeller teknolojisi gibi sistematik yaklaşımlar ile irdelenmektedir. Gıda işinlama ise geleneksel gıda koruma teknolojileri içinde değerlendirilmektedir (Çetinkaya 2003, Anonymous 2005).

Gıda kaynaklı mikrobiyel hastalıkların önemi dikkate alındığında, gıda güvenliğini tüketici düzeyinde sağlayacak gıda proseslerinin geliştirilmesi ve uygulanması öncelik kazanmaktadır. Sıvı gıdaların pastörizasyonu tatmin edici düzeyde iyi sonuçlar veren bir gıda koruma yöntemi olmakla beraber, pastörizasyon katı ve su aktivitesi düşük kuru gıdalar için uygun değildir. Bu gibi gıdalarda kimyasal katkı uygulaması kalıntı bırakması nedeni ile doğal problemlere ve çevre kirliliğine neden olmaktadır. Katı ve su aktivitesi düşük gıdalar için işinlama prosesinin oldukça uygun olduğu birçok çalışmada belirtilmektedir. Gıda işinlama, iyonlaştırıcı radyasyonun gıda koruma yöntemi olarak kullanılmasıdır. Ağırıklı olarak baharat işinlama için kullanılmakla beraber, ABD'de *E. coli* O157:H7 tehlikesine karşı kırmızı ette işinlama uygulanmasına başlanmıştır (Dickson 2001, Abbas 2002).

UV Radyasyonu

Mikrobiyolojik açıdan en etkili UV radyasyonu 240-280 nm arasındadır. En yüksek mikrobisit etkisinin görüldüğü dalga boyu 253,7 nm olup, bu dalga boyunda UV absorbanası maksimum düzeydedir. UV ışınları di-

rek olarak mikroorganizmanın DNA'sı üzerinde etkilidir. Mikroorganizmaların UV ışınlarına olan duyarlılıkları farklıdır. (Acar 1998, Anonymous 2004).

Gram negatif bakteriler UV ile kolaylıkla öldürülebilirken, endosporlar, küfler ve virüsler ise UV'ye karşı daha dirençlidir. Çeşitli mikroorganizmaların UV dirençliliği pigment oluşumuna bağlıdır. Pigment oluşturan koloniler UV radyasyonuna renksiz kolonilerden daha dirençli iken, siyah konidi oluşturan küfler oldukça yüksek dirençlilik göstermektedir (Moreno vd. 1997, Tartera vd. 1998).

UV radyasyonu; işletme havasının dezenfeksiyonu amacıyla, süt, bira, meyve suyu gibi gıdaların aseptik dolumunda; sosis ve peynirlerin olgunlaştırma odalarında; yüzeyde küf gelişimini engellemek amacıyla dilimlenmiş ekmeklerin ve keklerin paketlenmesinde; klor yerine suyun dezenfeksiyonunda; hidrojen peroksit ile paketlenme materyallerinin dezenfeksiyonunda kullanılmaktadır. UV radyasyonun derinliğe nüfuz edememesi, diğer bir ifade ile düşük penetrasyon gücü UV radyasyonun gıda korumada kullanılmasını zorlaştırmaktadır (Farkas 1997, Lee vd. 1998).

Mikrodalga

Mikrodalga diğer gıda koruma yöntemleri gibi yaygın şekilde kullanılan ve üzerinde çeşitli araştırmalar yapılmış olan bir gıda koruma yöntemidir. Mikrodalganın gıda korumada kullanımına yönelik araştırmalar 1940'lı yıllarda başlamıştır. 1944 yılında yapılan araştırmalar 60 MHz'in *E. coli* üzerinde en etkili frekans olduğunu göstermiş, ayrıca 30 MHz ve 190 MHz'in *E. coli* üzerinde güçlü bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir (Mullin 1995).

Sütün pastörizasyonu amacıyla yapılan farklı bir çalışmada 27 MHz kullanılmış ve mikrodalganın sadece gıda üzerinde ısı etkiye sahip olduğu gösterilmiştir. 1946 yılında yapılan diğer bir araştırmada ise 20 kHz'de *Bacillus coli* 'nin %99,5'nin öldürüldüğü tespit edilmiştir. Mikrodalga ve geleneksel ısıtma yöntemleri ile paralel olarak yapılan çalışmalarda ise her iki yöntem arasında önemli bir fark bulunamamış ve her iki yöntemin de *Bacillus cereus* sporlarının bertaraf edilmesinde yeterli olmadığı belirlenmiştir. 2450 MHz'de *Bacillus subtilis* ve *E. coli* üzerinde yapılan bir çalışmada ise mikrodalga'nın her iki bakteri üzerinde de ısı etkiye sahip olduğu görülmüştür (Goldblith ve Wang 1967).

Mikrodalgalarda gıda endüstrisinde değişik amaçlarla kullanılmaktadır. Bazı uygulamalarda amaç, dondurulmuş gıdanın çözülmesi veya yemeklerin ısıtılması gibi, ürünün yapısını bozmadan yalnızca sıcaklığını artırmaktır. Kurutma, haşlama ve vakum kurutma işlemleri mikrodalga ile kombine edilerek gıdaların kurutulması, korunması, raf ömrünün uzatılması sağlanmaktadır (Mullin 1995, Acar ve Cemeroglu 1998, Anonymous 2004).

Mikrodalgadan ekmeklerin pastörizasyonunda da uygulanmaktadır. Ercan ve ark. (1989) dilimlenmiş ekmeğin küflenmeye karşı korunmasında mikrodalgalardan yararlandığını belirtmiştir. Dilimlenmiş ve ambalajlanmış ekmeğin mikrodalga tüneline 90 °C'ye kadar ısıtıldığı zaman, herhangi bir kimyasal kullanılmadan uzun süre muhafaza edilebilmektedir (Acar ve Cemeroglu 1998).

Son zamanlarda mikrodalga çay yapraklarının kurutulmasında kullanılmaktadır. Mikrodalga kullanımı ile yapraklardaki su oranı % 8-10' dan %1-2' ye düşmektedir (Mullin 1995).

Amerika'da bütün endüstriyel uygulamalarda 915 MHz ve İngiltere'de 896 MHz'lik frekanslar kullanılmaktadır. Ticari ve tüketici mikrodalga fırınları ise 2450 MHz'de çalışmaktadır. 2450 MHz dünyada gıda endüstrisinde yaygın olarak kullanılan frekanstır. Genel olarak gıda endüstrisinde 915-2450 MHz' de çalışan mikrodalgalarda kullanılmaktadır (Ponne ve Bartels 1995).

İyonlaştırıcı Radyasyon (Işınlama)

İyonlaştırıcı radyasyon patojen ve patojen olmayan mikroorganizmalar ile ayrıca parazitlerin inaktivasyonunda etkili bir prosestir. Işınlama diğer yöntemlere göre yeni bir gıda muhafaza yöntemidir. Aynı zamanda ışınlama bugün tuzlama, kurutma, fumigasyon, ısı işlem uygulaması, dondurma vb. gibi geleneksel gıda koruma yöntemleri içinde de değerlendirilmektedir. Işınlamanın gıda korumada kullanılmasının temel nedenlerinden birisi, bozulmaya neden olan mikroorganizmalar ile veya tüketici üzerinde sağlık riski oluşturan patojenlerin inaktive edilmesidir (Abbas 2002, Anonymous 2005).

Gıda ışınlamada gama ışınları, X ışınları ve elektron demetleri yaygın olarak kullanılmakta olup, bu kaynakların kullanıma nedenlerini ise gıda üzerinde istenilen etkiyi oluşturmaları ve gıdada veya paketlenme ma-

teryalinde radyoaktiviteyi indüklememeleri oluşturmaktadır. Diğer radyasyon tipleri ise gıda ışınlamada kullanılmamaktadır. Gıda ışınlanmanın en önemli avantajı ürünün son ürün paketi içinde işlem görmesi olup, sonradan kontaminasyon olasılığını ortadan kaldırmasıdır (Dickson 2001, Anonymous 2005).

Uygulanan ışınlama dozuna göre radurizasyon, radisidasyon ve radappertizasyon olmak üzere 3'e ayrılır.

Radurizasyon, bozulmaya neden olan mikroorganizmaların sayısının azaltılmasını ve gıdaların buzdolabındaki raf ömrünün uzatılmasını hedefler. 5 kGy'e yaklaşan doz uygulaması ile bozulmaya neden olan mikroorganizmalar elimine edilirken, ışınlamaya dirençli ve metabolik olarak yavaş türler (*Moraxella*, laktik asit bakterileri ve mayalar) canlı kalır. Soğuk depolama süresince, bu canlı mikroorganizmalar, ışınlama sonrası ölenlere göre daha yavaş gelişir ve buna bağlı olarak bu ürünlerin raf ömrü ışınlanmamışlara göre 3-4 misli daha uzundur. Paketleme şekli önemlidir, anaerobik paketlemede laktik asit bakterileri ve mayalar baskın florayı oluşturur.

Radisidasyon, spor oluşturmeyen canlı patojenik mikroorganizmaları ve parazitlerin sayısını azaltmak için yapılan uygulamadır, böylece hijyenik kalite geliştirilir ve belirli patojenlerin oluşturduğu sağlık riski ortadan kaldırılır. Radisidasyon uygulaması ile de bozulmaya neden olan mikroorganizmaların sayısı azaltılarak gıdaların raf ömrü uzatılmaktadır.

Radappertizasyon, gıdada bulunan mikroorganizmaların çok azını yaşayabilir durumda kılan ve tamamen yok etmek için gerekli olan dozun gıdaya uygulanması işlemidir. Bu uygulamada özellikle radyasyona dirençli bakteri sporlarının kontrolü amaçlanmaktadır. Radappertizasyon için gerekli ışınlama dozu ışınlamaya en dirençli mikroorganizma baz alınarak hesaplanır. Asitliği ve tuz konsantrasyonu düşük olan gıdalarda *Clostridium botulinum* Tip A sporları hedef alınır. Güvenli radappertizasyon prosesi için bu sporlar hedef alındığında desimal indirgeme düzeyi 12 D'dir ve bu indirgenme 45-50 kGy ile sağlanmaktadır (Farkas 1997, Diehl 1990, Abbas 2002).

Çizelge 1'de gıda gruplarına göre radurizasyon, radisidasyon ve radappertizasyon örnekleri verilmiştir.

Çizelge 1. Gıda ışınlamada çeşitli uygulamalar için gerekli dozlar

Uygulama	Gerekli doz (kGy)
Radurizasyon (meyve, sebze, et, tavuk, balık)	0,5-10
Radisidasyon (dondurulmuş et, tavuk, yumurta diğer gıda ve yemler)	3,0-10 kGy
Radappertizasyon (et, tavuk, balık ürünleri)	25-60

İŞINLAMANIN MİKROORGANİZMALAR ÜZERİNE ETKİSİ

İşinlanmanın hücre üzerinde direk ve indirek olmak üzere iki etki şekli söz konusudur. Direk etkide ışınlama ile hücre DNA'sı arasındaki etkileşim önemlidir. Bu etkide genetik materyal hasarı radyasyon enerjisinin genetik materyale çarpması sonucunda oluşur (Grecz vd. 1983).

İşinlanmanın direk etkisi hücrelerdeki yaşamsal açıdan kritik hedef olan genetik materyale zarar vererek mikroorganizmaları inaktive etmektedir. Canlı hücrede radyasyon sonrası oluşan genetik hasar çoğalmayı engeller ve hücredeki birçok yaşamsal faaliyeti sonlandırır. Gıdalarda işinlanmanın etkili bir şekilde uygulanmasının temeli hücre bölünmesi sırasında DNA sentezini inhibe etmesine dayanmaktadır. Işınlama ile mikroorganizmaların ölümü DNA'nın zarar görmesinin bir sonucudur. Enerji fotonu veya elektron hücrenin genetik materyaline rast gele çarpar ve DNA'da lezyonlara neden olur. Bu lezyonlar DNA'nın tek iplikçisinde kırılma şeklinde olabildiği gibi DNA'nın yapısı uygun ise, enerji ve elektron çift iplikçik kırılmalarına neden olabilir. Tek iplikçik lezyonları çoğunlukla ölümcül olmamakla birlikte, geniş çaptaki tek iplikçik kırılmaları bakterinin tamir kapasitesini aşabilir ve sonuçta hücrenin ölümü ile sonuçlanabilir. Çift iplikçik kırılmaları ise DNA'yı iki parçaya ayırır ve ölümcüldür. DNA'nın yapısından dolayı çift iplikçik lezyonları tek iplikçik kırılmalarına oranla daha az sıklıkta oluşmaktadır. Işınlama DNA'da purin, pirimidin ve deoksiriboz şekerine kimyasal olarak zarar verirken, fizikokimyasal zararlanmalar ile de fosfodiester bağlarında tek veya çift iplikçik kırılmalarına neden olur. (Farkas 1997, Dickson 2001, Anonymous 2005)

İndirek etkide ise genetik materyale yakın moleküller özellikle su molekülleri ile radyasyonun interaksyonu söz konusudur. Radyasyon su molekülünden bir elektron ayrılmasına neden olur. İndirek etkiyi özellikle

sudan oluşan radyolitik ürünler olan serbest radikaller ve genetik materyal arasında gerçekleşen reaksiyonlar oluşturmaktadır. Sudan oluşan radikaller arasında H, OH ve e^-_{aq} yer almaktadır. En önemli reaktif komponentler OH iyonları ve hidrojen peroksittir. Bu moleküller nükleik asitler ve tek iplikçikte bir nükleik asidi diğerine bağlayan kimyasal bağlar ile reaksiyon oluşturmaktadır. İyonize su moleküllerinin lokalizasyonunun rast gele oluşması nedeniyle nükleik asitlerle sonradan oluşan reaksiyonlar da rast gele oluşur. Işınlamanın oluşturduğu çift iplikçik kırılmaları, tek iplikçik kırılmalarının %5-10'u kadardır. Birçok mikroorganizma tek iplikçik kırılmalarını onarabilmektedir. *E. coli* gibi ışınlamaya hassas mikroorganizmalar çift iplikçik kırılmasını onaramamaktadır. İyonlaştırıcı radyasyon DNA'nın çevresinde bir su tabakası oluşturarak DNA hasarının % 90'ından sorumludur. Böylece canlı hücrelerde indirek radyasyon zararı baskındır (Grant ve Peterson 1989, Farkas 1997).

Genetik materyale ilave olarak radyasyon, hücrenin diğer bileşenleri üzerinde de çeşitli etkilere sahiptir. Radyasyon uygulaması, hücredeki membran, enzimler ve plazmitler gibi hücre yapıları üzerinde de direk ve indirek interaksiyonlar oluşturmakta ve ölümcül olabilmektedir. Işınlamada meydana gelen serbest radikaller çiftleşmemiş elektronlara sahip olup, hücre membranındaki protein ve lipitlerle de etkileşimde bulunmaktadır. Işınlama ile hasar görmüş hücrelerde stoplazmik membranın zarar görmesi ve seçici geçirgenliğini yitirmesinin sonucu olarak hücre içi yapıların ve özellikle RNA'nın hücre dışına çıkarak kaybı söz konusu olmaktadır. Radyasyon ile değişimler hücresel düzeyde olup, mikroorganizmalara göre değişkenlik göstermektedir. Gıda kaynaklı bazı mikroorganizmaların taze gıda ortamında radyasyona karşı dirençleri Çizelge 2 'de verilmiştir (Dickson 2001).

Çeşitli organik bileşiklerin radyasyon hassasiyeti moleküler ağırlıkları ile orantılıdır. 0,1 kGy'in aminoasitlerin % 0,005'ine, enzimlerin % 0,14'üne DNA'nın % 2,8'ine hasar verdiği tahmin edilmektedir. Genetik hasarın etkilerini genetik olmayan hasardan ayırmak oldukça zordur (Dickson, 2001).

Işınlamaya Direnç ve Duyarlık

Birçok çevresel faktör mikroorganizmaların radyasyon dirençliliğini etkilemektedir. Uygulanan ışınlama dozunun etkinliğinde mikroorganizmaların bulunduğu ortamın bileşimi önemli rol oynamaktadır. Fosfat tampon ortamında ışınlanan hücreler gıda içinde ışınlanana oranla ışınlamaya karşı çok daha fazla hassastır (Grecz vd. 1983).

Genelde ortamın kompleksliği arttıkça, ortamdaki sudan oluşan serbest radikaller için ortamdaki diğer bileşenlerin rekabeti artmakta, ışınlama ile oluşan moleküller aktive olmakta ve bu durum mikroorganizmalar için koruyucu etki oluşturmaktadır. Kompleks yapıya sahip gıdalardaki bakteriyel hücrelerin radyasyona dirençliliğini veya duyarlılığını tahmin etmek ise mümkün olmamaktadır (Davies 1976, Dickson 2001).

Gıdanın su aktivitesindeki azalma mikroorganizmaları ışınlamanın öldürücü etkisinden korumaktadır. Kuru şartlarda ışınlamada sudan oluşan serbest radikallerin oluşumu daha azdır ve dolayısı ile indirek etki ile oluşan DNA hasarı azalmaktadır (Diehl 1990)

Işınlanacak ürünün bulunduğu sıcaklık derecesi mikroorganizmaların radyasyona karşı direncini etkilemektedir. 45 °C'nin üzerine yükseltilmiş sıcaklık uygulaması genellikle vejetatif hücreler için sinerjetik olarak radyasyonun öldürücü etkisini artırmaktadır. Bu durum tümüyle DNA tamir mekanizması ile ilişkilidir ve gelişme sıcaklığının üzerindeki değerlerde bu mekanizma inaktive olmaktadır (Grecz vd. 1983)

Dondurma işlemi vejetatif hücrelerin radyasyona dirençliliğinde önemli bir artışa neden olmaktadır. Mikroorganizmaların radyasyon dirençliliği dondurulmuş ortamlarda, oda sıcaklığına göre 2-3 kat artmaktadır. Bu artışa ortam donduğu zaman serbest radikallerin immobilize olması ve serbest difüzyonun engellenmesi neden olmaktadır. Böylece dondurulmuş durumda, OH iyonları ile DNA'nın indirek hasarı önlenmekte ve daha fazla doz uygulaması gerekmektedir. Sıcaklık ile dirençlilikte değişme su aktivitesi yüksek gıdalarda indirek etkinin önemini göstermektedir (Diehl 1990).

Mikroorganizmalar üzerinde iyonize radyasyonun öldürücü etkisi oksijen varlığında artmaktadır. Nemli şartlarda ve oksijen yokluğunda genellikle radyasyona dirençlilik 2-4 kat artarken, kuru şartlarda ve oksijen yokluğunda 8-17 kat artmaktadır (Dickson 2001).

Teknolojik açıdan gıda ışınlamada minimum doz gereksinmesi söz konusudur. Uygulama amacına göre verilen doz değişmektedir. Bazı durumlarda yüzeyin ışınlanması yeterli iken diğer durumlarda ise gıda için minimum dozu alması gerekmektedir (Farkas 1997).

Çizelge 2. Bazı gıda kaynaklı mikroorganizmaların radyasyon direnci

Mikroorganizma	Taze gıdadaki D ₁₀ Değeri (kGy)
<i>Vibrio</i> spp.	0,03-0,12
<i>Yersinia enterocolitica</i>	0,04-0,21
<i>Campylobacter jejuni</i>	0,08-0,21
<i>Aeromonas hydrophila</i>	0,14-0,19
<i>Bacillus cereus</i> (vejetatif hücre)	0,17
<i>Bacillus cereus</i> (spor)	1,6
<i>E. coli</i>	0,23-0,35
<i>E. coli</i> O157:H7	0,24-0,27
<i>Staph. aureus</i>	0,26-0,6
<i>Salmonella</i> spp.	0,3-0,8
<i>Listeria monocytogenes</i>	0,27-1,0
<i>Lactobacillus</i> spp.	0,3-0,9
<i>Clostridium perfringens</i> (vejetatif hücre)	0,59-0,83
<i>Clostridium sporogenes</i> (spor)	1,5-2,2
<i>Clostridium botulinum</i> Tip E (spor)	1,25-1,40
<i>Clostridium botulinum</i> Tip A ve B (spor)	1,0-3,6
<i>Deinococcus radiodurans</i>	2,5-3,1
<i>Deinobacter</i> spp.	5,05

Işınlamaya karşı direnç ve duyarlık mikroorganizmanın boyutu, fiziksel ve kimyasal yapısı ve radyasyon hasarlarını onarabilme yeteneği ile de ilişkilidir. Böcek hücrelerindeki DNA bakterinin DNA'sından daha büyüktür. Memeli organizmaların DNA'sı ise bakteri ve böceklerden daha büyüktür, sonuç olarak hedef büyüdüğü radyasyona karşı duyarlılık artmaktadır (Diehl 1990). Çizelge 3'te çeşitli canlı gruplarının öldürülmesi için gerekli radyasyon dozları verilmiştir (Farkas 1997)

Çizelge 3. Çeşitli organizmaları öldürmek için gerekli yaklaşık radyasyon dozları

Organizmalar	Doz (kGy)
Yüksek hayvanlar	0,005-0,1
Böcekler	0,01-0,1
Spor oluşturmeyen bakteriler	5-10
Bakteri sporları	10-50
Virüsler	10-200

Gram negatif bakteriler ve özellikle *Salmonella* ve *Shigella* gibi enterik türleri içeren patojenler Gram pozitif bakterilerin vejetatif formlarına göre ışınlamaya karşı genel olarak daha duyarlıdır (Anderson vd. 1956).

Bakterilerin vejetatif formları ile spor formları karşılaştırıldığında spor formlarının radyasyona daha dirençli olduğu görülmektedir. Bunun başlıca nedenleri ise, sporların su konsantrasyonlarının (%10) vejetatif hücrelere (%70) göre düşük olması, sporun koruyucu etkisi nedeniyle spordaki DNA'nın radyasyona daha dirençli olması, sporun yapısındaki S-S'ce zengin dipikolinik asit gibi bazı kimyasal bileşiklerin radyasyona direnç sağlamasıdır. Germinasyon süresince su içeriği artan sporlu bakterilerin radyasyon dirençliliği azalır (Davies 1976).

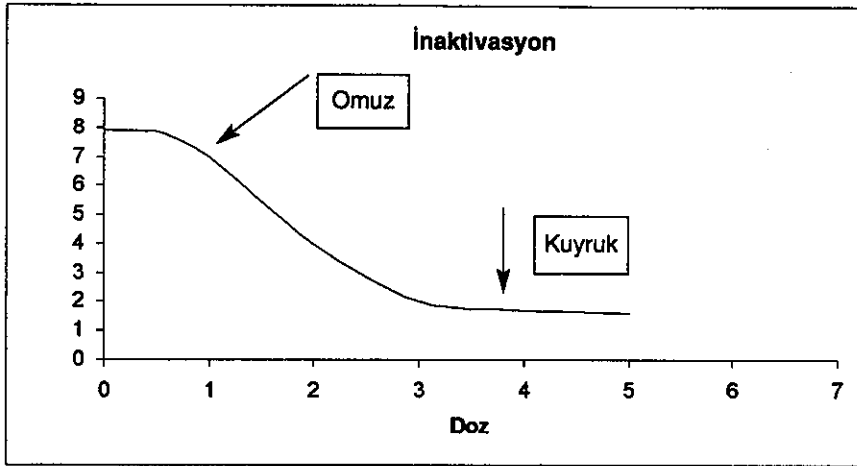
Birçok küfün radyasyona karşı direnci bakterilerin vejetatif formlarına benzemektedir, sadece koyu renkli hifleri olan küflerin dirençliliği bakteriyel sporlar kadar yüksek olabilmektedir (Saleh vd. 1998).

Mayalar ışınlamaya dirençli bakteriler kadar direnç gösterirlerken, virüsler ise radyasyona karşı oldukça dirençlidir. Virüslerin direncinin, özellikle dehidrasyon dereceleri, ışınlama sırasındaki sıcaklık, buldukları ortamdaki organik materyallerin konsantrasyonu gibi bir kaç faktöre bağlı olduğu tespit edilmiştir (Dawes 1976).

D₁₀ Değerinin Hesaplanması

Işınlama prosesinde D₁₀ değeri belirli şartlar altında spesifik mikroorganizma popülasyonunun % 90'ını diğer bir ifade ile mikroorganizma sayısında bir desimal azalmayı sağlayan radyasyon dozu olarak tanımlanmaktadır. Sıcaklık direncine benzer olarak, mikrobiyel popülasyondaki radyasyon direnci desimal indirgenme ile açıklanabilir. Doz ve canlı mikroorganizma arasındaki ilişki grafiksel olarak ifade edildiğinde D₁₀ doğrunun eğiminin tersi olarak ifade edilir (-1 / eğim).

Isıl işlem uygulamasında olduğu gibi gerekli doz hesabı için D₁₀ değeri hesaplanır. Ancak bu hesaplama ısı işlemdekinden farklı olarak yaklaşmaktadır. Işınlama prosesi sonrasında çizilen grafiklerde özellikle *Deinococcus* gibi radyasyona dirençli mikroorganizmalarda Şekil 1'deki grafikte görüldüğü üzere omuz bölge-



Şekil 1. Radyasyona dirençli mikroorganizmaların inaktivasyon grafiği

si oluşmaktadır. Omuz bölgesi düşük doz uygulamalarının neden olduğu genetik hasarın DNA tamir mekanizması ile onarıldığını ifade etmektedir. Kuyruk bölgesi ise, uygulanan radyasyon dozlarında beklenen düzeyden daha yüksek sayıda canlı kalan mikroorganizmaları göstermekte olup, bu bölge radyasyona karşı direnç ile değil daha çok homolog popülasyonun çevresel strese karşı verdiği yanıt ile ilişkilidir. Grafikte görülen kuyruk bölgesi 0,5 kGy radyasyon dozu uygulaması sonucunda ortamdaki oksijenin tüketilmiş olduğu şeklindeki bir hipotezi belirtmektedir (Dickson 2001).

D₁₀ değeri, genel olarak ölüm eğrisinin doğrusal kısmı üzerinde hesaplanmaktadır. Omuz bölgesi hesaplamalar yapılırken dikkate alındığında desimal indirgeme için gerekli gerçek dozun altında bir değer elde edilmektedir (Dickson 2001).

KAYNAKLAR

- Abbas, S.M.N. 2002. Baharat Mikroflorası Üzerine Işınlamanın Etkisi. Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Gıda Mühendisliği AbD, Doktora Tezi 81s. Ankara
- Acar, J. 1998. Mikroorganizmaların Öldürülmesi. Alınmıştır, "Adnan Ünlütürk ve Fulya Turantaş (Ed.).Gıda Mikrobiyolojisi." Sayfa:243-249. Mengi-Tan Basımevi, İzmir, 605s.
- Acar, J., Cemeröglü, B. 1998. Işınlarda Muhafaza. Alınmıştır, "Meyve ve Sebze Teknolojisi Cilt II. Sayfa:193-216. Hacettepe Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, Ankara, 406s.
- Anderson, A.W., Nordon, H.C., Cain, R.F., Parnish, G., Duggan, D. 1956. Studies on a Radioresistant Micrococcus. The isolation morphology, cultural characteristics and resistance to gamma radiation. Food Technol. 10:575-577

- Anonymous 2004. Radiation Basics. <http://nuclearhistory.tripod.com/radiation.html>
- Anonymous 2005. Facts about food irradiation <http://www.iaea.org/programmes/nafa/d5/public/foodirradiation.pdf>
- Aydın, T. 2003. Işınlama Tesisleri. Alınmıştır "Gıda Işınlama Kurs Notları". Sayfa: 27-41, Türkiye Atom Enerjisi Kurumu, Ankara, 225s.
- Çetinkaya, N. 2003. Gıda Işınlamaya Bakış. Alınmıştır "Gıda Işınlama Kurs Notları". Sayfa: 7-8, Türkiye Atom Enerjisi Kurumu, Ankara, 225s.
- Davies, R. 1976. The inactivation of vegetative bacterial cell by ionizing radiation. In "Inhibition and inactivation of vegetative microbes. Sayfa: 239-255, Academic Press, London.
- Dawes, I.W. 1976. Inactivation of yeast. In "Inhibition and inactivation of vegetative microbes. Sayfa: 279-304, Academic Press, London.
- Dickson, J. 2001. Radiation inactivation of microorganisms. In "Food Irradiation Principles and Applications". Sayfa: 23-32, John Wiley&Sons, New York, USA, 469s.
- Diehl, J.F. 1990. Biological Effects of Ionizing Radiation in "Safety of irradiated foods" Sayfa 95-136, Marcel Dekker Inc., New York, USA, 345s.
- Diehl, J.F. 2001. Achievements in food irradiation during the 20th century. In "Paisan Loaharanu and Paul Thomas (Ed.). Irradiation for Food Safety and Quality. Sayfa: 1-7, IAEA. Technomic Publishing Company, Inc., Lancaster, USA, 216s.
- Ercan, B., Acar, J., Aşkın, O., 1989. Mikrodalgalar, gıda endüstrisinde kullanım alanları ve mikroorganizmaların üzerine etkileri, Gıda 14(3)141-148
- Etzel, R.A. 2001. Epidemiology of foodborne illness role of Food irradiation. 51-54s., IAEA. Technomic Publishing Company, Inc., Lancaster, USA, 216s.
- Farkas, J. 1997. Physical Methods of Food Preservation. In "Michael P. Doyle, Larry R. Beuchat & Thomas J. Montville (Ed.). Food Microbiology Fundamentals and Frontiers." Sayfa: 497-519. ASM Press Washington D.C. 768s.
- Goldblith, S.A., Wang, D.I.C. 1969. Effect of microwaves on *Escherichia coli* and *Bacillus subtilis*. Appl. Microbiol., 15(6), 1371-1375.
- Grant, I.R., Patterson, M.F. 1989. A novel radiation resistant *Deinobacter* spp. isolated from irradiated pork. Lett. Appl. Microbiol. 8:21-24
- Grecz, N., Rowley, D.B., Matsuyama, A. 1983. The action of Radiation on bacteria and viruses. In "E.S. Josephson ve M.S. Peterson (Ed.). Preservation of Food by Ionizing Radiation, vol.2. CRC Press, Inc., Boca Raton, Fla
- Juri, M. Bin Lebai, Ali, N.M., 2005. Fundamentals of Ionizing Radiation. Alınmıştır "Ahmed HJ, Z., Besar, HJ, I., ve Hassan, S., (Ed) Radiation Awareness" Sayfa: 1-12, Malaysian Institute for Nuclear Technology and Research, Ministry of Science Technology and Innovation. Copyright MINT 2005.
- Lee, B.H., Kermasha S., Baker, B.E. 1989. Thermal ultrasonic and ultraviolet inactivation of Salmonella in thin films of aqueous media and chocolate. Food Microbiol. 6 (3) 143-152.
- Mead, P.S., Slutsker, L., Dietz, V., McCaig, L.F., Bresee, J.S., Shapiro, C., Griffin, P.M., Robert V. Tauxe, R.V. 1999. Food-Related Illness and Death in the United States. CDC Emerging Infectious Diseases (5)5 <http://www.cdc.gov/ncidod/eid/vol5no5/mead.htm>
- Moreno, M.A., Del Carmen Ramos, M., Gonzalez, A., Suarez, G. 1987. Effect of ultraviolet light irradiation on viability and aflatoxin production by *Aspergillus parasiticus*. Can. J. Microbiol. 33:927-929.
- Moy, G. 1992. Foodborne diseases and the preventive role of food irradiation. IAEA Bulletin 4:39-43.
- Mullin, J. 1995. Microwave Processing. In "G.W. Gould (Ed.). New Methods of Food Preservation." Sayfa: 112-134. Blackie Academia & Professional, Chapman & Hall, Glasgow, 325s.
- Ponne, C.T., Bartels, P.V. 1995 Interaction of electromagnetic energy with biological material- relation to food processing. Radiation. Phys. Chem 45:591-607.
- Saleh, Y.G., Mayo, M.S., Ahearn, D.G. 1988. Resistance of some common fungi to gamma irradiation. Appl. Environ. Microbiol., 54:2134-2135
- Siyakuş, G. 2004. Gıda Işınlamanın Tarihçesi. Alınmıştır "Gıda Işınlama Kurs Notları". Sayfa: 15-26, Türkiye Atom Enerjisi Kurumu, Ankara, 110s.
- Tartera, C., Bosch, A., Jofre, J. 1998. The inactivation of bacteriophages infecting *Bacteriodes fragilis* by chlorine treatment and UV-irradiation. FEMS Microbiol. Letter 56:313-316.
- Topal, R.Ş. 1996. Gıda Güvenliği ve Kalite Yönetim Sistemleri. TÜBİTAK-MAM Matbaası Gebze, 225 s.
- Tunail, N. 2000. Mikrobiyel Enfeksiyonlar ve İntoksikasyonlar Gıda Mikrobiyolojisi ve Uygulamaları, Genişletilmiş 2. Baskı. Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Gıda Mühendisliği Bölümü Yayını 2000 yılı basımı 522 sayfa kitap.
- Ünal, Z. 2003. TAEK – ANTHAM gama ışınlama tesisi ve işlem kontrolü. <http://das.org.tr/kitap2003/17.htm>