

Elektron Demeti Hızlandırıcıları Teknolojisi

Fiziksel Çalışma İlkesi, Küresel ve Türkiye’de Durum ve Stratejik Değerlendirme

Not: Bu uzun makale hazır yazılardan ‘Kes Yapıştır’ Derlemesi değildir . Her ‘Bilim Sayfası’ ilgili yayınlar incelenerek ve 2 farklı YZ ile 5-6 taslakta tartışılarak yeniden kaleme alınıp hazırlanmıştır .

Radyasyon dozunun besin ve insan hücrelerinde olabilecek değişimleri yazının son bölümünde Dünya’ca tanınmış yetkili organların verileriyle ele alınmıştır.

Hazırlayan Yüksel Atakan Dr.Radyasyon Fizikçisi, ybatakan4@gmail.com, 22.02.2026 /I/

YÖNETİCİ ÖZETİ

1. Elektron Demeti Hızlandırıcısı Nedir?

Elektron demeti hızlandırıcıları (Electron beam accelerators), elektron demetlerinin güçlü elektrik alanlar yardımıyla çok yüksek hızlara — ışık hızına yakın düzeylere — çıkarıldığı ve kontrollü biçimde bir hedefe yönlendirildiği ileri teknoloji sistemleridir. Yirminci yüzyılın başında temel parçacık fiziği araştırmaları amacıyla geliştirilen bu sistemler, bugün endüstrinin çok geniş bir yelpazesinde kritik altyapı teknolojileri arasında yer almaktadır.

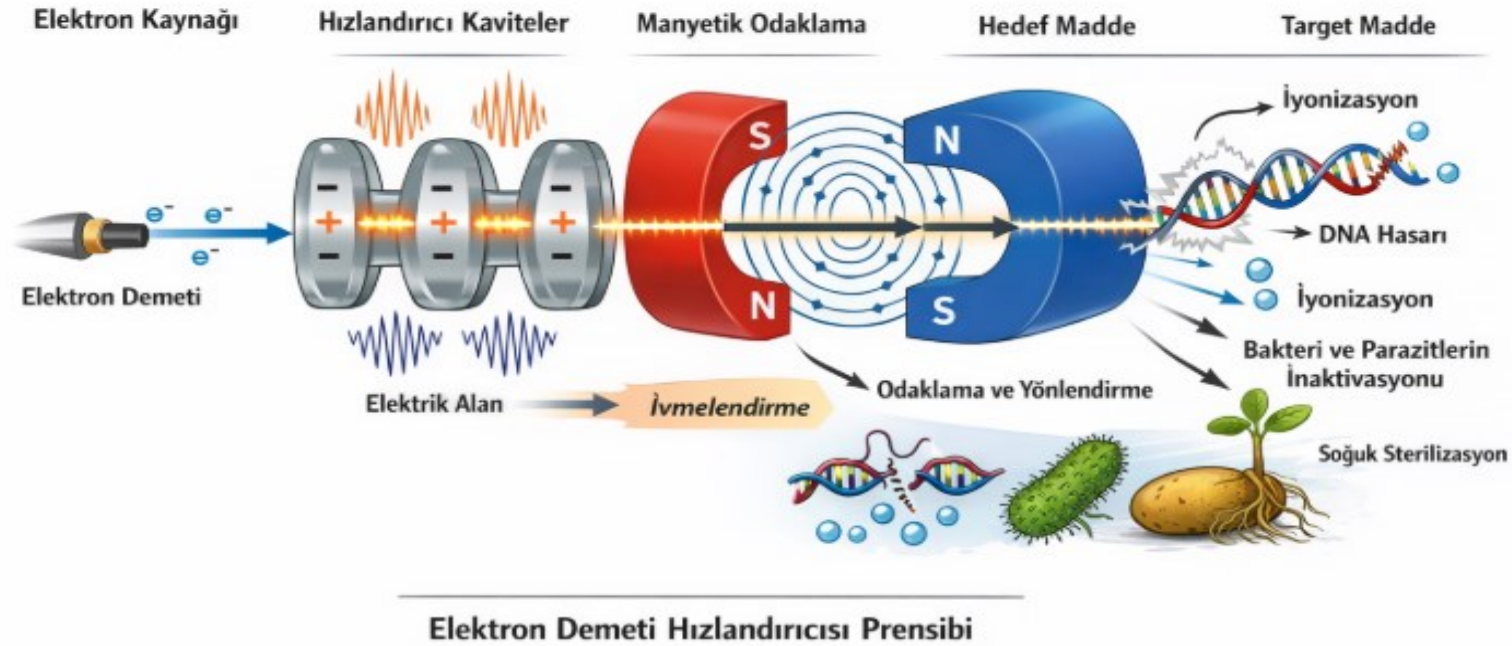
Çalışma ilkesi üç temel fizik yasasına dayanır:

- **Coulomb kuvveti:** Katot ile anot arasına uygulanan yüksek voltaj, elektronu hızlandırır.
- **Lorentz kuvveti:** Manyetik alanlar demeti odaklar ve hedefe hassas biçimde yönlendirir.
- **İyonizasyon:** Yüksek enerjili elektronlar maddeye çarptığında atomlardan elektron koparır, DNA zincirlerini kırar ve mikroorganizmaları etkisizleştirir.

Stratejik çıkarımlar:

- Elektron demet (E-demet) teknolojisi küresel ölçekte güçlü bir büyüme eğilimi içindedir; Çin ve ABD bu alanda büyük yatırımlar yapmaktadır.
- Türkiye'nin tungsten rezervleri ve teknik insan gücü, yerli hızlandırıcı üretimi için sağlam bir temel sunmaktadır.

- 5–10 MeV ölçeğinde yerli bir endüstriyel E-demet tesisi; ithalat bağımlılığını azaltacak, ihracat fırsatı yaratacak ve savunma-sanayi boyutunda stratejik güvenlik sağlayacaktır. Ankara’da faaliyet gösteren Elektron Teknolojileri Anonin Şirketi (ETAŞ), bu teknolojik dönüşümün Türkiye’deki öncü özel sektör kurumu olarak konumlanmaktadır (<https://www.elektroneteknolojileri.com>).



Temel özelliği: Radyoaktif kaynak içermez; sistem anında durdurulup tekrar çalıştırılabilir; doz kontrolü duyarlı olarak yapılabilir. Bu nedenle gama ışınlama sistemlerine göre, güvenlik, esneklik ve düzenleyici uyum açısından belirgin üstünlük sağlar.

2. Uygulama Alanları

Sektör	Uygulama	Sağlanan Fayda
Besin Güvenliği	Baharat, et, meyve-sebze ısınlama	Raf ömrü uzar, patojenler yok edilir
Tıbbi Sterilizasyon	Tek kullanımlık tıbbi ürünler, implantlar	Radyoaktifsiz güvenli sterilizasyon
Malzeme Mühendisliği	Polimer çapraz bağlama, kablo izolasyonu	Isıya ve kimyasallara dayanım artar
Çevre Teknolojileri	Atık su arıtımı, baca gazı temizleme	Kimyasal madde kullanımı azalır
Endüstriyel Kaynak	Havacılık, otomotiv, savunma bileşenleri	Derin, hassas, kirlenmeyen kaynak
İnce Film Kaplama	Yarı iletken, optik yüzeyler	Yüksek saflık ve homojenlik

3. Dünya'daki Durum

Dünya genelinde 10.000'i aşkın endüstriyel hızlandırıcı aktif olarak kullanılmakta; küresel pazar büyüklüğü 2024 itibarıyla 3–4 milyar USD'ye ulaşmış ve istikrarlı büyüme sürmektedir. Yıllık ısınlanmış besin miktarı 700.000–1.000.000 ton bandındadır. Çin toplam dünya kapasitesinin yaklaşık %40'ını elinde bulundurmaktadır.

Ülke	Yıllık ısınlanan Besin miktarı	Başlıca Ürünler	Teknoloji
Çin	300.000–400.000 ton	Sarımsak, baharat, et	E-demet + Gama
ABD	100.000–120.000 ton	Baharat, kırmızı et, tavuk	E-demet + Co-60
Hindistan	60.000–80.000 ton	Baharat, mango	Gama + E-demet
Almanya	10.000–15.000 ton	Baharat, tıbbi ürünler	E-demet + Gama
Türkiye	< 1.000 ton	Baharat (kısıtlı)	Gama (ağırlıklı)

Bir çok modern teknolojiye olduğu gibi bu teknolojiye de Çin başta!

4. Türkiye ve ETAŞ

Türkiye'de besin ısınlama ve endüstriyel E-demet kapasitesi, ülkenin büyüklüğüne ve potansiyeline karşın son derece sınırlı kalmaktadır. TENMAK-NÜKEN'de (Ankara) ağırlıklı olarak baharat ve bakliyat ısınlamada kullanılan gama (Co-60) kaynaklı bir ısınlama tesisi bulunmaktadır. Tam ölçekli yerli E-demet üretimi henüz gelişme aşamasındadır. Oysa ülkenin et, baharat, tıbbi ürün ve atık su sektörlerindeki toplam talep potansiyeli yüz binlerce ton ve yüz milyonlarca ürün ölçeğindedir.

Bu tablonun değişmesinde kritik bir rol üstlenen ETAŞ Elektronik Teknolojileri A.Ş., 2021 yılında Ankara'da kurulmuş olup Türkiye'nin bu alandaki ilk yerli tasarım ve üretim şirkettir. Akademisyen kökenli ekibiyle kilo-volttan mega-volta uzanan enerji aralığında elektron hızlandırıcıları geliştiren ETAŞ; EDK kaynak makinesi, sterilizasyon sistemi, buharlaştırma ve X-ışını üretimi ürün ailesiyle sektöre girmiş, TÜBİTAK TEYDEB desteğiyle Ar-Ge çalışmalarını sürdürmektedir.

1. GİRİŞ

Elektron demeti hızlandırıcı teknolojisi, modern fiziğin temel ilkelerine dayanan ve günümüzde çok geniş bir uygulama alanına sahip ileri mühendislik sistemlerinden biridir. Bu teknoloji, yüklü parçacıkların elektrik alanlar yardımıyla çok yüksek hızlara çıkarılması ve kontrollü biçimde bir hedef üzerine yönlendirilmesi temeline dayanır. İlk olarak yirminci yüzyılın başlarında temel parçacık fiziği araştırmaları amacıyla geliştirilen hızlandırıcı sistemler, zamanla sanayi, tıp, malzeme bilimi, savunma teknolojileri, çevre mühendisliği ve besin güvenliği gibi çok sayıda stratejik alana uyarlanmıştır.

Elektron demeti hızlandırıcıları, özellikle iyonlaştırıcı radyasyonun kontrollü üretimini sağlamaları nedeniyle, gama ışın kaynaklarına alternatif olarak öne çıkmıştır. Radyoaktif bir kaynak içermemeleri, sistemin istenildiği anda çalıştırılıp durdurulabilmesi ve doz kontrolünün hassas biçimde yapılabilmesi, bu teknolojiyi güvenlik açısından avantajlı kılar. Bu özellikler, özellikle besin ısınlama ve tıbbi sterilizasyon gibi toplum sağlığını doğrudan ilgilendiren alanlarda büyük önem taşımaktadır.

Son kırk yılda küresel ölçekte yaşanan gelişmeler, bu teknolojinin önemini daha da artırmıştır. Artan dünya nüfusu, küreselleşen besin ticareti, uzun mesafeli ulaşım ve taşımacılık, antibiyotik direnci gelişen mikroorganizmalar ve besin kaynaklı hastalık olaylarındaki artış, besin güvenliğini uluslararası bir güvenlik sorunu durumuna getirmiştir. Benzer biçimde, tek kullanımlık steril tıbbi ürünlere olan gereksinim, özellikle bulaşıcı hastalık salgınları (pandemi) döneminde dramatik biçimde artmıştır. Bu bağlamda elektron demeti hızlandırıcıları, hem ekonomik hem de stratejik açıdan kritik altyapı teknolojileri arasında yer almaya başlamıştır.

Başta Amerika Birleşik Devletleri, Çin, Almanya ve Japonya olmak üzere birçok ülke, endüstriyel elektron demeti tesislerine önemli yatırımlar yapmaktadır. Özellikle Çin, hem kapasite hem de kurulu tesis sayısı bakımından dünya lideri konumundadır.

Bu yazının amacı; elektron demeti hızlandırıcı teknolojisinin fiziksel çalışma ilkelerini basit ve anlaşılır bir dille açıklamak, küresel kullanım durumunu ortaya koymak ve Türkiye açısından stratejik bir değerlendirme sunmaktır.

Elektron demeti hızlandırıcıları (Electron beam accelerators), yüklü parçacıkların elektrik alanlar yardımıyla yüksek hızlara çıkarılması ilkesine dayanan ileri teknoloji sistemleridir. Son 40 yıl içinde sanayi, tıp, çevre ve besin güvenliği alanlarında stratejik öneme sahip ileri teknoloji sistemleri haline gelen bu

cihazların, günümüzde dünyada 10.000'in üzerinde endüstriyel ünitesinin aktif olarak kullanıldığı tahmin edilmektedir. Günümüzde başta Amerika Birleşik Devletleri, Çin, Almanya ve Japonya olmak üzere birçok ülke bu alanda endüstriyel ölçekli yatırımlar yapmaktadır.

Başlıca kullanım alanları:

- Tek kullanımlık tıbbi ürünlerin sterilizasyonu
- Besin ısınlama ve raf ömrü uzatma
- Kanalizasyon ve tıbbi atık su arıtımı
- Termik santral baca gazı arıtımı
- Polimer modifikasyonu ve malzeme mühendisliği
- Havacılık, otomotiv ve savunma sanayii

Özellikle son 20–30 yılda artan besin kaynaklı hastalıklar ve küresel tedarik zincirlerinin büyümesi, bu uygulamaların kapsamını genişletmiştir.

2. ELEKTRON DEMETİ TEKNOLOJİSİNİN FİZİĞİ?

Elektron demeti hızlandırıcılarının çalışma ilkesi temel olarak üç fizik yasasına dayanır:

1. **Yüklü parçacıkların elektrik alan içinde ivmelenmesi**
2. **Manyetik alan ile yönlendirme**
3. **İyonlaştırıcı radyasyonun madde ile etkileşimi**

2.1 Elektron Nasıl Hızlandırılır?

Elektron negatif yüklü bir parçacıktır. Temel ilke şudur: Bir elektrik alan içinde bulunan yüklü parçacık kuvvet duyumsar ve ivmelenir.

Hızlandırıcıda bu elektrik alan kuvveti, katot ile anot arasında uygulanan yüksek gerilim (voltaj) sayesinde elektronları hızlandırmak için kullanılır.

Hızlandırıcıda işleyiş:

- **Katot:** Elektron üretir (örneğin tungsten veya lantanyum hekzaborür — LaB₆).
- **Yüksek Voltaj:** Katot ile anot arasına çok yüksek voltaj uygulanır.
- **İvmelenme:** Elektronlar bu elektrik alan içinde hızlanır ve vakum ortamında hareket ederek enerji kazanırlar.

Elektronun kazandığı enerji, uygulanan voltajla doğru orantılıdır:

$$E = e \cdot V$$

Burada E enerjiyi (Joule ya da elektron volt), e elektron yükünü ($1,6 \times 10^{-19}$ C), V ise uygulanan voltajı (Volt) gösterir. Örneğin 10 MeV'lik (Milyon Elektron Voltluk) bir hızlandırıcıda elektronlar yaklaşık ışık hızına çok yakın hızlara ulaşır.

2.2 Manyetik Alan Ne İşe Yarar?

Hareketli elektron manyetik alana girdiğinde Lorentz kuvvetine maruz kalır.

Lorentz Kuvveti Nedir?

Lorentz kuvveti, yüklü bir parçacığın elektrik ve manyetik alan içinde maruz kaldığı toplam kuvvettir:

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

Yalnızca manyetik bileşen ele alındığında $\mathbf{F} = q(\mathbf{v} \times \mathbf{B})$ ifadesi kullanılır. Burada q parçacık yükü, v hız vektörü ve B manyetik alan vektörüdür. Hızlandırıcılarda manyetik alanlar şu işlevleri yerine getirir:

- Elektron demeti odaklanır.
- Yol boyunca oluşabilecek sapmalar düzeltilir.
- Hedefe kontrollü ve hassas yönlendirme sağlanır.

Bu ilke tüm modern hızlandırıcılarda temel bileşen olarak kullanılmaktadır.

2.3 Besin veya Malzemede Ne Olur?

Yüksek enerjili elektronlar bir maddeye çarptığında:

- Atomlardan elektron koparır (iyonizasyon).
- DNA zincirlerini kırar.
- Mikroorganizmaların çoğalmasını engeller.

Bu sayede:

- Bakteriler ölür ve parazitler etkisizleşir.
- Küf sporları işlevsiz hâle gelir.
- Filizlenme durur.
- Besinlerin raf ömürleri uzar.

Bu işlem ısıtma gerektirmediğinden "soğuk sterilizasyon" olarak da adlandırılır. Elektron demetiyle besinlerin ısıtılması, besin korumasını stratejik bir teknoloji hâline getirmiştir.

2.4 Vakum Ortamı Neden Gereklidir?

Elektronların hava molekülleriyle çarpışması önemli enerji kayıplarına yol açar. Bu nedenle hızlandırıcı tüpleri yüksek vakum altında çalışır ($10^{-6} - 10^{-8}$ mbar). Vakum ortamı aynı zamanda kaynak ve sterilizasyon uygulamalarında kirlenme riskini ortadan kaldırır, son ürünün saflığını güvence altına alır.

2.5 Madde ile Etkileşim (Genel)

Yüksek enerjili elektronlar maddeye çarptığında atomlardan elektron koparır (iyonizasyon), DNA zincirlerini kırar ve mikroorganizma hücre yapısını bozar. Sonuç olarak bakteri ve parazitler inaktive olur, filizlenme durur ve raf ömrü uzar. Bu işlem ısıl olmadığı için "soğuk sterilizasyon" olarak adlandırılır.

3. HIZLANDIRICI TÜRLERİ

3.1 Doğrusal Hızlandırıcı (LINAC)

Elektronlar doğrusal bir hat boyunca ivmelendirilir. Endüstriyel uygulamalarda en yaygın tiptir. Yüksek enerji verimliliği ve kompakt tasarım imkânı sunduğundan, besin ışınlama ve tıbbi sterilizasyon tesislerinde tercih edilir.

3.2 Sinkrotron

Elektronlar dairesel yörüngede hızlandırılır. Sinkrotronlar daha çok araştırma amaçlı kullanılır ve son derece parlak X-ışını demetleri üretebilir. Malzeme bilimi, biyomedikal araştırmalar ve kristalografi gibi alanlarda bilimsel kullanımı yaygındır.

4. TEKNİK BİLEŞENLER

Bir elektron demeti hızlandırıcısı şu ana bileşenlerden oluşur:

- Elektron kaynağı (katot)
- Yüksek voltaj sistemi
- RF (radyo frekansı) ivmelendirme yapısı
- Manyetik odaklama sistemi
- Vakum sistemi
- Soğutma sistemi
- Kontrol ve güvenlik sistemi

5. ELEKTRON KAYNAKLARI

5.1 Termiyonik Katotlar

Isıtılmış bir katot malzemesinden elektron yayılımı elde edilir. Bu yöntem en yaygın ve güvenilir elektron üretme tekniğidir. Kullanılan başlıca malzemeler ve işlevleri şöyledir:

Malzeme	Kimyasal Sembol	Özelliği ve İşlevi
Tungsten	W	Çok yüksek erime noktası (3.422 °C), yüksek sıcaklıkta stabil elektron emisyonu sağlar. Endüstriyel sistemlerde yaygın.
Lantanyum Hekzaborür	LaB ₆	Düşük iş fonksiyonu sayesinde daha az ısıtmayla yüksek elektron akısı sağlar. Bilimsel ve hassas uygulamalarda tercih edilir.

 Tungsten ve diğer metaller bu teknolojide neden önemlidir? Tungsten (W), periyodik tablonun en yüksek erime noktasına sahip metalidir (3.422 °C). Hızlandırıcılarda katot malzemesi olarak kullanılan tungsten, yüksek sıcaklıklara dayanarak kararlı elektron yayımı sağlar. Türkiye, dünya tungsten rezervlerinin önemli bir bölümüne sahip olmakla birlikte, bu rezervlerin yerli teknoloji üretiminde değerlendirilmesi stratejik bir fırsattır. LaB₆ ise daha düşük çalışma sıcaklığında daha yüksek elektron akısı sağladığından yüksek hassasiyetli bilimsel sistemlerde öne çıkar.

5.2 Fotoelektron Kaynakları

Lazer ışınıyla tetiklenen, son derece kısa ve yoğun elektron darbecikleri üreten bu kaynaklar, özellikle fotonik ve serbest elektron lazer (FEL) uygulamalarında kullanılır. Yüksek parlaklık ve düşük enerji dağılımı (düşük emittans) gerektiren araştırma sistemlerinde tercih edilmektedir.

5.3 Alan Emisyon Kaynakları

Çok güçlü bir elektrik alan altında metal yüzeyinden elektron çekimiyle çalışır. Nanometre ölçeğinde uç geometrileri sayesinde son derece küçük alandan yüksek akım elde edilebilir. Özellikle elektron mikroskopisi ve litografi gibi uygulamalarda kullanılır.

6. BESİN GÜVENLİĞİ VE IŞINLAMA

6.1 Besin Işınlamanın Uluslararası Düzenleyici Durumu

Besin ısınlama güvenliği, aşağıdaki uluslararası kuruluşlar tarafından bilimsel kanıtlarla desteklenmiş ve kabul edilmiştir:

- Dünya Sağlık Örgütü (WHO — World Health Organization): Besin ısınlamayı insan sağlığı açısından güvenli bulan kapsamlı raporlar yayımlamıştır.
- BM Gıda ve Tarım Örgütü (FAO — Food and Agriculture Organization): Besin ısınlama konusunda WHO ile ortak kılavuzlar geliştirmiştir.
- Kodeks Alimentarius Komisyonu (Codex Alimentarius Commission): BM bünyesindeki bu uluslararası gıda standartları kuruluşu, besin ısınlama için uluslararası standartları belirler. "Codex Alimentarius" Latince olup "Gıda Kanunu" ya da "Gıda Kuralları" anlamına gelir; 1963 yılında FAO ve WHO tarafından kurulmuştur.
- ABD Gıda ve İlaç İdaresi (FDA — U.S. Food and Drug Administration): 1963 yılında buğday ve unun ısınlanmasını onaylamış; kırmızı et, beyaz et, baharat, taze meyve ve sebzeler için onay kapsamını zamanla genişletmiştir. **(Bu konudaki ayrıntılı açıklamalar için son Bölüm'e bkz).**

 *Codex Alimentarius Komisyonu nedir? BM bünyesinde FAO ve WHO tarafından 1963 yılında kurulan bu uluslararası kuruluş, gıda güvenliği ve ticaretine ilişkin uluslararası standartları belirler. "Codex Alimentarius" ifadesi Latince "Gıda Kanunu" anlamına gelir ve 180'den fazla üye ülkeyi kapsar.* 6.2 Dünyada Besin ısınlama Kullanım Miktarları

Dünya genelinde yıllık toplam ısınlanmış besin miktarının yaklaşık 700.000 – 1.000.000 ton aralığında olduğu tahmin edilmektedir

Elektron Demeti (E-demet) Tesis Fiyatları — Güç ve Enerji Seviyesine Göre
Tahmini Cihaz + Kurulum Maliyetleri (USD) | 2024–2025 Piyasa Verileri

Fiyatlandırmayla ilgil Genel Bilgi

Bir elektron demeti hızlandırıcı tesisinin toplam maliyeti; **enerji seviyesi (MeV), demet gücü (kW), akseleratör tipi, malzeme taşıma sistemi, radyasyon kalkanı, kontrol sistemleri ve kurulum** gibi bileşenlere göre belirlenir. Cihaz bedeline ek olarak; inşaat/altyapı, radyasyon kalkanı (beton/kurşun), otomasyon ve sertifikasyon maliyetleri tüm kurulum bedelinin önemli bir bölümünü oluşturur. **Toplam proje maliyeti (TCO) genellikle cihaz bedelinin 1,5–3 katına ulaşır.**

6.2. Enerji ve Güç Seviyesine Göre Tesis Maliyetleri

Kategori	Enerji (MeV)	Güç (kW)	Akseleratör Tipi	Tahmini Cihaz Bedeli (USD)	Tahmini Toplam Kurulum Bedeli (USD)	Geri Dönüş Süresi	Tipik Uygulama Alanları
Düşük Enerji (Giriş Seviyesi)	0,1 – 0,5 MeV (100–500 kV)	5 – 50 kW	DC (Dinamitron, Van de Graaff)	300.000 – 800.000 USD	500.000 – 1,5 M USD	3–5 yıl	Kablo/tel çapraz bağlama, yüzey kaplama, baskı/mürekkep kürleme
Orta-Düşük Enerji	0,5 – 1,5 MeV	30 – 200 kW	DC (Dinamitron), RF Linac	800.000 – 2,5 M USD	1,5 – 4 M USD	3–6 yıl	Polimer modifikasyonu,

Kategori	Enerji (MeV)	Güç (kW)	Akseleratör Tipi	Tahmini Cihaz Bedeli (USD)	Tahmini Toplam Kurulum Bedeli (USD)	Geri Dönüş Süresi	Tipik Uygulama Alanları
							tıbbi ambalaj sterilizasyonu, atık su ön arıtımı
Orta Enerji (Endüstriyel)	3 – 5 MeV	50 – 300 kW	RF Linac, Rhodotron	2,5 – 6 M USD	5 – 10 M USD	4–7 yıl	Besin ışınlama (baharat, meyve), tıbbi sterilizasyon, polimer
Yüksek Enerji (Standart)	5 – 10 MeV	100 – 500 kW	Rhodotron (IBA), LINAC (NHV, Mevex)	5 – 12 M USD	8 – 20 M USD	4–8 yıl	Et/kırmızı et ışınlama, medikal sterilizasyon, atık su, baca gazı
Çok Yüksek Enerji	7 – 10 MeV (X-ışını modu)	300 – 700 kW	Rhodotron TT1000 (IBA), Palettron sistemi	10 – 20 M USD	15 – 35 M USD	5–10 yıl	Palet halinde büyük hacimli ışınlama, büyük endüstriyel tıbbi sterilizasyon merkezleri
Araştırma / Sinkrotron	10 – 1.000+ MeV	100 kW – 1.000+ kW	Sinkrotron, SRF Linac	20 – 500+ M USD	50 M – 1+ milyar USD	10–20+ yıl	Parçacık fiziği, malzeme bilimi, ilaç Ar-Ge, nükleer tıp

Önde Gelen Üreticiler ve Referans Modeller

Üretici / Model	Ülke	Enerji Aralığı	Güç Aralığı	Tahmini Fiyat (USD)	Özellik / Uygulama
IBA Rhodotron® TT100	Belçika	3–10 MeV	35 kW	3 – 6 M USD	Giriş seviyesi Rhodotron; besin ışınlama ve sterilizasyon
IBA Rhodotron® TT200	Belçika	3–10 MeV	80 kW	6 – 10 M USD	Orta kapasite; tıbbi sterilizasyon, besin, polimer
IBA Rhodotron® TT300	Belçika	3–10 MeV	200 kW	10 – 16 M USD	Yüksek kapasite endüstriyel; büyük besin ve tıbbi tesisler

Üretici / Model	Ülke	Enerji Aralığı	Güç Aralığı	Tahmini Fiyat (USD)	Özellik / Uygulama
IBA Rhodotron® TT1000	Belçika	5–7 MeV	700 kW	18 – 30 M USD	En yüksek güçlü Rhodotron; X-ışını üretimi, palet ışınlama
NHV (Japonya) — EPS/ESH Serisi	Japonya	0,15 – 5 MeV	5 – 200 kW	500.000 – 8 M USD	Geniş enerji aralığı; tel/kablo, tıbbi ambalaj, yüzey kaplama
Mevex (STERIS) — Linac Serisi	Kanada	3 – 10 MeV	10 – 50 kW	2 – 7 M USD	RF Linac tabanlı; araştırma ve orta ölçekli endüstriyel
CGN Dasheng (Çin)	Çin	1,5 – 10 MeV	10 – 100 kW	1 – 5 M USD (Rekabetçi fiyat)	Çin pazarı başta; besin, polimer, atık su. Devlet destekli.
ETAŞ (Türkiye) — miniEDK Serisi	Türkiye	0,2 – 2 MeV (Geliştirme aşamasında)	< 20 kW (Prototip)	TBD — Yerli üretim hedefi	Türkiye'nin ilk yerli EDK makinesi (miniEDK200/2000); EDK kaynak ve buharlaştırma uygulamaları

Toplam Proje Maliyetine Dahil Edilmesi Gereken Ek Kalemler

Yapısal / İnşaat	Güvenlik ve Düzenleyici	Operasyonel (Yıllık)	İşletme Ömrü ve Bakım
Radyasyon kalkanı (beton/kurşun): 500.000 – 3 M USD Altyapı ve bina: 200.000 – 1 M USD Malzeme taşıma/konveyör: 100.000 – 500.000 USD Vakum sistemi: 50.000 – 300.000 USD	Lisans ve sertifikasyon: 50.000 – 200.000 USD Dozimetri sistemi: 30.000 – 100.000 USD Güvenlik PLC ve izleme: 50.000 – 150.000 USD Personel eğitimi: 20.000 – 80.000 USD	Enerji tüketimi: 100.000 – 1 M USD/yıl Bakım ve yedek parça: %1–3 cihaz bedeli/yıl Personel (operatör, teknisyen): 100.000 – 300.000 USD/yıl Sigorta ve denetim: 20.000 – 80.000 USD/yıl	Tipik işletme ömrü: 15–25 yıl Katot/elektron tüpü değişimi: 5–10 yılda bir Büyük revizyon maliyeti: 500.000 – 2 M USD Yükseltme (upgrade) imkânı: evet (modüler sistemlerde)

* Tüm fiyatlar USD cinsinden tahmini değerlerdir. IBA Rhodotron model fiyatları; IAEA endüstriyel hızlandırıcı raporları, Cleland (CERN, 2006), UV+EB Technology dergisi (2024) ve sektör danışmanlık kaynaklarından derlenmiştir.

* NHV, Mevex ve CGN Dasheng fiyatları; kamuya açık pazar araştırma raporlarından (Valuates Reports, Business Research Insights, 2024) elde edilmiştir.

* Toplam Proje Maliyeti (TCO) = Cihaz bedeli + Altyapı + Güvenlik + Yıllık operasyonel maliyet × İşletme yılı. Geri dönüş süresi hesabında tesis doluluk oranı (%60–80) ve ışınlama hizmet geliri dikkate alınmıştır.

6.3 Ülke Bazlı Kullanım Miktarları ve Işınlama Hizmet Fiyatları

Ülkelere Göre Besin Işınlama (E-demet) Kapasitesi ve Tahmini Hizmet Fiyatları
Elektron Demeti Hızlandırıcıları Teknolojisi — Küresel Pazar Verileri 2024–2025 Tahmini

Fiyatlandırma Hakkında

Elektron demeti ışınlama hizmet fiyatları; **ürün türü, uygulanan doz (kGy), tesis kapasitesi, enerji maliyetleri ve ülkedeki rekabet ortamına** göre önemli ölçüde değişmektedir. Aşağıdaki fiyat aralıkları; USDA, IAEA ve sektör raporlarından derlenen kamuya açık veriler ile bölgesel endeksler kullanılarak türetilmiş **tahmini ortalama** değerlerdir. Baharat gibi düşük-yoğunluk ürünlerde ton başı maliyet düşükken, yüksek doz gerektiren et ve tıbbi ürünlerde maliyet belirgin biçimde artar.

Ülke	Yıllık Işınlanan Besin (Ton)	Başlıca Ürünler	Kullanılan Teknoloji	Tahmini E-demet Hizmet Fiyatı (USD/ton)	Açıklama / Fiyat Etkenleri
Amerika Birleşik Devletleri	100.000–120.000	Baharat, kırmızı et, tavuk	E-demet + Co-60	80–150 USD/ton	Yüksek tesis kapasitesi, gelişmiş rekabet ortamı. Et için üst sınıra yakın.
Çin	300.000–400.000	Sarımsak, baharat, et	E-demet + Gama	30–70 USD/ton	Düşük işçilik ve enerji maliyeti, devlet destekli tesis yatırımları.
Hindistan	60.000–80.000	Baharat, mango	E-demet + Gama	40–80 USD/ton	Büyüyen tesis altyapısı; baharat ihracatı için E-demet kullanımı artıyor.
Brezilya	25.000–40.000	Et ve tropikal meyveler	Gama	60–100 USD/ton	Ağırlıklı gama kullanımı; E-demet kapasitesi sınırlı, fiyat görece yüksek.
Fransa	20.000–25.000	Baharat	Gama	100–160 USD/ton	AB düzenlemeleri ve yüksek işletme maliyetleri fiyatı yukarı çekiyor.
Belçika	15.000–20.000	Baharat ve kuruyemiş	Gama	100–150 USD/ton	AB merkezli hizmet hub'ı; yüksek kalite standartları ve denetim maliyetleri.

Ülke	Yıllık Işınlanan Besin (Ton)	Başlıca Ürünler	Kullanılan Teknoloji	Tahmini E-demet Hizmet Fiyatı (USD/ton)	Açıklama / Fiyat Etkenleri
Hollanda	~15.000	Et ürünleri	Gama	110–160 USD/ton	Avrupa'nın en yüksek enerji maliyetleri; AB sertifikasyon gereksinimleri.
Almanya	10.000–15.000	Baharat, tıbbi ürünler	E-demet + Gama	120–180 USD/ton	En yüksek düzenleyici standartlar. Tıbbi ürünlerde fiyat üst sınıra yakın.
Güney Kore	5.000–10.000	Kurutulmuş ürünler	E-demet	70–120 USD/ton	E-demet ağırlıklı modern tesis altyapısı; orta düzey fiyat.
Japonya	3.000–5.000	Baharat, tıbbi malzeme	E-demet + Gama	130–200 USD/ton	Çok sıkı gıda güvenliği mevzuatı ve yüksek enerji maliyeti.
Türkiye	< 1.000 (sınırlı)	Baharat (kısıtlı)	Gama (ağırlıklı)	Veri yok (≈80–140 tahmini)	Yerli E-demet hizmeti yok. Mevcut gama tesisi fiyatı.

Referans Fiyat Aralıkları — Ürün Türüne Göre (Küresel Ortalama)

Ürün Kategorisi	Tipik Doz (kGy)	Düşük Maliyet Bölgesi (Çin, Hindistan)	Orta Maliyet Bölgesi (ABD, G.Kore)	Yüksek Maliyet Bölgesi (AB, Japonya)
Baharat ve kuru bitkiler	5–30 kGy	30–60 USD/ton	80–120 USD/ton	100–150 USD/ton
Taze meyve ve sebze	0,15–1 kGy	20–40 USD/ton	60–100 USD/ton	90–140 USD/ton
Kırmızı et ve tavuk	1,5–4,5 kGy	50–80 USD/ton	80–150 USD/ton	120–180 USD/ton
Tıbbi sterilizasyon	25–50 kGy	80–150 USD/ton	150–250 USD/ton	200–400 USD/ton

* Kaynaklar: USDA Economic Research Service, IAEA Industrial Electron Accelerators, sektör raporları (Market Growth Reports, Business Research Insights 2024). Fiyatlar tahmini olup ticari sözleşme koşulları, hacim indirimleri ve tesis özellikleri nedeniyle değişkenlik gösterir.

* 1 ton = 1.000 kg. Birim fiyat hesabı: ton başı USD = hizmet bedeli / işlenen ağırlık. Tıbbi sterilizasyon fiyatları adet bazlı da uygulanabilir (medikal ürün/birim).

Not: Çin, dünya toplam kapasitesinin yaklaşık %40'ına sahiptir. Almanya, sınırlı besin ışınlaması yapmasına karşın E-demet teknoloji üretiminde dünya liderleri arasında yer almaktadır.

7. ELEKTRON DEMETİ TEKNOLOJİSİNİN GAMA IŞINLAMAYA GÖRE AVANTAJLARI

Kriter	Elektron Demeti (E-demet)	Gama (Co-60)
Radyoaktif kaynak	Yok	Var (Kobalt-60)
Aç/Kapa kontrolü	Anlık	Sürekli radyasyon
İşlem süresi	Kısa	Uzun
Güvenlik	Yüksek	Kaynak güvenliği kritik
Regülasyon	Daha kolay	Daha karmaşık
Nüfuz derinliği	Ürün kalınlığına göre sınırlı (5–10 MeV)	Daha derin (yüksek enerjili foton)

E-demet teknolojisi özellikle güvenlik, operasyonel kontrol ve çevresel açıdan gama sistemlerine belirgin üstünlük sağlar.

8. TEKNİK PARAMETRELER

Besin uygulamalarında tipik teknik değerler:

- Enerji: 5–10 MeV
- Doz aralığı: 0,2 – 10 kGy (kilo Gray)
- Yüksek doz sterilizasyon: 25 – 50 kGy

Doz birimleri:

$$1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg} \quad 1 \text{ kGy} = 1.000 \text{ Gy}$$

Gray (Gy) birimi, soğurulan radyasyon dozunu ifade eder. Kilogram başına düşen Joule cinsinden tanımlanır. Sterilizasyon uygulamalarında genellikle 25 kGy ve üzeri dozlar kullanılırken, besin konservasyonunda 0,2–10 kGy aralığı tercih edilir.

9. ENDÜSTRİYEL ELEKTRON HIZLANDIRICI PAZARI

Küresel endüstriyel hızlandırıcı pazarı 2024 itibarıyla yaklaşık 3 – 4 milyar USD büyüklüğündedir ve önümüzdeki on yılda istikrarlı bir büyüme öngörülmektedir.

Başlıca üretici ülkeler: Almanya, Japonya, Amerika Birleşik Devletleri, Çin.

Başlıca üretici firmalar:

- IBA Industrial (Belçika)
- Mevex (Kanada)
- NHV Corporation (Japonya)
- Wasik Associates (ABD)
- Comet Technologies (İsviçre)
- EB-TECH (Güney Kore)

Teknik ve Ekonomik Fizibilite Özeti

5–10 MeV bir endüstriyel sistem için:

- Yatırım maliyeti: 5 – 15 milyon USD
- Geri dönüş süresi: 4 – 7 yıl
- Enerji tüketimi: 100 – 500 kW
- İşlem kapasitesi: 5 – 20 ton/saat

10. TÜRKİYE'DE DURUM VE STRATEJİK DEĞERLENDİRME

BÖLÜM 10

Türkiye'de Durum ve Stratejik Değerlendirme

10.1 Genel Durum

Türkiye'de besin ışınlama kapasitesi son derece sınırlı olup mevcut tesisler ağırlıklı olarak gama (Co-60) temeline dayanmaktadır. Tam ölçekli, yerli üretimli endüstriyel E-demet sistemi henüz bulunmamaktadır.

Türkiye'nin yüksek potansiyele sahip pazar segmentleri:

- **Hastaneler ve özel klinikler** (sterilizasyon)
- Tek kullanımlık medikal ürün üreticileri
- Süt ve et entegre tesisleri
- **Belediyeler** (atık su arıtımı)
- **Termik santraller** (baca gazı arıtımı)
- Baharat ve kuru gıda ihracatçıları

10.2 Türkiye'de Elektron Demeti Teknolojisiyle İlgili Araştırma Merkezleri

Türkiye'de elektron demeti hızlandırıcı teknolojisi alanında çalışmaları olan bir dizi akademik ve kurumsal merkez mevcuttur. **Ancak bu merkezlerin tamamı araştırma ve Ar-Ge amaçlıdır; besin ışınlaması, tıbbi sterilizasyon veya endüstriyel E-demet hizmeti sunmamaktadır.** Türkiye'de endüstriyel elektron hızlandırıcıları tasarlayıp ve üretimini yapan **ETAŞ** şirketi bulunmaktadır. İthal edilmiş elektron hızlandırıcılarını kablo, plastik gibi endüstri alanlarında kullanan üretici firmalar da mevcuttur. Örneğin Ankara'da bulunan Tamer Elektrik firmasında (<https://www.tamerelektrik.com.tr>) 3 MeV'lik elektron hızlandırıcısı kullanılarak elektron ile ışınlama yoluyla ve çapraz bağlama yöntemi ile kablo, lastik ve plastik ürünlerine dayanıklılık kazandırılmaktadır.

Kurum / Merkez	Proje / Program	Elektron Demeti ile İlgili Odak Alanı	Faaliyet Türü
TÜRK HIZLANDIRICI VE IŞINIM LABORATUVARI (TARLA)	Süperiletken elektron hızlandırıcısına dayalı serbest elektron lazeri (FEL) tesisi ve araştırma istasyonları	Elektron hızlandırıcısı altyapısına sahip Türkiye'nin en kapsamlı tesisi. Elektron tabanlı ışınlama araştırmaları, malzeme ve biyolojik örneklerin ışınlaması.	 Yalnızca Araştırma / Ar-Ge
TENMAK-NÜKEN (Türkiye Enerji, Nükleer ve Maden Araştırma Kurumu - Nükleer Enerji Enstitüsü)	Proton ve elektron hızlandırıcı tesisleri. Hızlandırıcıya dayalı Ar-Ge ve radyoizotop üretimi	Hızlandırıcı tabanlı radyasyon uygulamaları ve radyoizotop üretimi. Endüstriyel E-demet altyapısıyla örtüşen yetki alanı; ancak ticari hizmet sunmamaktadır.	 Yalnızca Araştırma / Ar-Ge

Kurum / Merkez	Proje / Program	Elektron Demeti ile İlgili Odak Alanı	Faaliyet Türü
ANKARA ÜNİVERSİTESİ Hızlandırıcı Teknolojileri Enstitüsü (HTE) & PALS Araştırma Grubu	Parçacık hızlandırıcıları ve ısıtım kaynakları alanlarında Ar-Ge ve proje çalışmaları	Parçacık hızlandırıcıları ve ısıtım kaynakları tasarımı. Elektron hızlandırıcı sistem Ar-Ge'si. TARLA ile eş güdümlü akademik çalışmalar.	 Yalnızca Araştırma / Ar-Ge
ODTÜ - İVMER	Hızlandırıcı ve uzay teknolojileri alanında araştırma ve uygulama projeleri	Hızlandırıcı ve radyasyon teknolojileri Ar-Ge'si. Endüstriyel E-demet ile kısmi örtüşme; ağırlıklı odak uzay uygulamaları	 Yalnızca Araştırma / Ar-Ge
ETAŞ Elektronik Teknolojileri A.Ş. — Ankara (İvedik OSB + Teknopark)	Endüstriyel elektron hızlandırıcısı tasarımı, imalatı ve ticarileştirme	Türkiye'nin ilk ve tek yerli endüstriyel E-demet üreticisi. EDK kaynak, sterilizasyon, buharlaştırma ve X-ışını sistemleri. TÜBİTAK TEYDEB destekli projeler.	 Endüstriyel Üretim + Ar-Ge (Yerli Üretici)

(*) Tablo kamuya açık kaynaklara (kurumsal web siteleri, TENMAK, Ankara Üniversitesi HTE, TÜBİTAK) dayalı olarak derlenmiştir. Kurumların proje kapsamı zamanla değişkenlik gösterebilir.  Türkiye Atom Enerjisi Kurumu (TAEK) 2022 yılında kapatılmış; nükleer ve radyasyon güvenliği görevleri Nükleer Düzenleme Kurumu'na (NDK) devredilmiştir.

10.3 Türkiye için Sonuç ve Stratejik Boşluk

Türkiye'nin araştırma ekosistemi değerlendirildiğinde, elektron demeti teknolojisinde güçlü bir akademik temel mevcut olduğu görülmektedir. Bununla birlikte **araştırma kapasitesi ile ticari/endüstriyel uygulama arasında kritik bir boşluk** bulunmaktadır. Dünyada pek çok ülkede bu boşluk; özel sektör yatırımları, kamu-özel ortaklıkları ve teknoloji transferiyle kapatılmıştır.

Bu bağlamda öne çıkan stratejik fırsatlar:

- TARLA ve TENMAK-NÜKEN altyapısının endüstriyel ısıtılma pilot tesislerine dönüştürülmesi (*pilot besin/tıbbi ısıtılma hattı*)

- ETAŞ'ın geliştirdiği yerli sistemlerin yukarıdaki araştırma merkezleriyle ortak test ve sertifikasyon süreçlerine entegre edilmesi
- Türkiye'nin tungsten rezervlerinin yerli katot üretimine yönelik değerlendirilmesi
- 5–10 MeV ölçeğinde ilk ticari endüstriyel E-demet besin ısınlama tesisinin kamu-özel ortaklığıyla kurulması

Türkiye'nin yüksek potansiyele sahip pazar segmentleri:

- Hastaneler ve özel klinikler (sterilizasyon)
- Tek kullanımlık medikal ürün üreticileri
- Süt ve et entegre tesisleri
- Belediyeler (atık su arıtımı)
- Termik santraller (baca gazı arıtımı)
- Baharat ve kuru gıda ihracatçıları

10.4. TÜRKİYE İÇİN EKONOMİK FIRSAT ANALİZİ

Türkiye'nin potansiyel yurt içi talebi:

Sektör	Yıllık Potansiyel İşlem
Baharat	15.000 – 20.000 ton
Et ürünleri	50.000+ ton
Patates depolama	200.000+ ton
Medikal sterilizasyon	100 milyon adet/yıl
Atık su arıtımı	Büyük kentsel kapasiteler

Yerli üretim bir E-demet ünitesi; dışalım (ithalatı) azaltır, dışsatım (ihracat) potansiyeli oluşturur ve stratejik teknoloji bağımsızlığı sağlar.

10.5 ETAŞ ELEKTRONİK TEKNOLOJİLERİ A.Ş. — TÜRKİYE'NİN İLK YERLİ ELEKTRON DEMET ŞİRKETİ ETAŞ-

WEB SAYFALARINDAN AKTARILAN BİLGİLER

Türkiye'de elektron demeti hızlandırıcı teknolojisi alanındaki en önemli gelişmelerden biri, 2021 yılında kurulan ETAŞ Elektronik Teknolojileri Anonim Şirketi'nin faaliyete geçmesidir. ETAŞ, bu kritik teknoloji alanında Türkiye'nin dışa bağımlılığını azaltmak ve yerli-millî üretim kapasitesi oluşturmak amacıyla akademisyen kökenli bir ekip tarafından kurulmuştur.

Kuruluş Amacı ve Vizyonu

ETAŞ; akademik hayatta biriktirilen bilgi ve deneyimi Türkiye endüstrisinin hizmetine sunmak, yüksek teknoloji ürünü olan elektron hızlandırıcılarını yerli imkânlarla üretmek ve bu teknolojinin endüstriyel uygulamalarını hayata geçirmek amacıyla kurulmuştur.

Şirketin vizyonu: Elektron demeti kaynağı, malzeme iyileştirme ve tıbbi sterilizasyon hizmetleri veren cihazları yurt dışından satın almak yerine tasarlayıp ülke içinde üretmek; bu teknolojileri geliştirerek hem yurt içi ihtiyacı karşılayan hem de dünya pazarına ürün sunan bir firma olmak.

Misyonu ise kilo-volttan mega-volta kadar potansiyellerde elektronların enerjisini artırıp odaklayarak üreticinin, sanayicinin ve toplumun hizmetine sunmak; bu süreçte gereken tüm cihazları yerli olanaklarla tasarlamak ve üretmek; aynı zamanda yarının mühendis ve teknisyenlerini yetiştirmektir.

Şirket Profili ve Teknik Ekip

Bilgi	Detay
Kuruluş Yılı	2021
Unvan	ETAŞ Elektronik Teknolojileri Anonim Şirketi
Merkez	İvedik OSB Mah. Melih Gökçek Blv. 1445. Sk. No:13, Yenimahalle/ANKARA
Teknopark Ofis	Teknopark Ankara TGB Yerleşkesi, İvedik OSB Mah. 2224. Cad. No: 1/115, Yenimahalle/ANKARA
İletişim	bilgi@elekronteknolojileri.com +90 506 578 3827
Web	www.elekronteknolojileri.com
Nitelik	Türkiye'nin ilk yerli endüstriyel elektron demeti hızlandırıcı üreticisi

TÜBİTAK Projesi	S-Bandında çalışacak Şerit Dolayıcı Geliştirme (TEYDEB 1507) — TÜBİTAK tarafından kabul edilmiştir.
-----------------	---

Liderlik ve Teknik Kadro

ETAŞ, fizik ve mühendislik alanlarında uzmanlaşmış akademisyen ve araştırmacılardan oluşan bir ekip tarafından yönetilmektedir:

- **N. Gökhan Ünel** — Yönetim Kurulu Başkanı
- **Ümit Kaya** — Üretim ve Planlama Müdürü
- **Görkem Türemen** — Ar-Ge ve Prototipleme Müdürü
- **V. Erkan Özcan** — Strateji Geliştirme Müdürü

Ekipte ayrıca elektronik ve haberleşme mühendisleri, fizikçiler, makine mühendisleri ve uluslararası ticaret uzmanları görev yapmaktadır.

ETAŞ — Neden Elektron Demeti Kaynağı (EDK) Tercih Edilmeli?

ETAŞ olarak, en zorlu uygulamalarınız için üstün hassasiyet ve güç sunan Elektron Demeti Kaynağı (EDK) teknolojisinde uzmanız. Aşağıda EDK'nın lazer kaynak gibi diğer yöntemlere göre öne çıkma nedenleri detaylı biçimde ele alınmaktadır.

Eşsiz Nüfuz ve Derinlik Kontrolü

- **Üstün Nüfuz:** EDK, daha kalın malzemeler ve yüksek yapısal bütünlük gerektiren uygulamalar için ideal olan daha derin ve hassas kaynaklar sunar.
- **Kesin Derinlik Kontrolü:** Kaynak derinliğinde hassas kontrol sağlayarak tüm eklemlerde tutarlı kalite ve güç elde edilir.

Yüksek Verimlilik ve Minimal Bozulma

- **Enerji Verimliliği:** EDK, odaklanmış bir elektron demeti kullanarak kinetik enerjiyi doğrudan ısıya dönüştürür ve bu da yüksek verimlilik sağlar.
- **Düşük Termal Bozulma:** Konsantre ısı kaynağı, termal bozulmayı ve artık gerilmeleri en aza indirir, malzemenizin bütünlüğünü korur.

Esneklik ve Çeşitlilik

- **Geniş Malzeme Uyumluluğu:** EDK, yüksek erime noktası metaller dahil olmak üzere çeşitli malzemelerle uyumludur; bu da onu çeşitli endüstriler için çok yönlü bir seçim haline getirir.
- **Karmaşık Geometriler:** Elektron demeti, karmaşık şekiller ve geometrilerde hassas kaynaklar yapmak için mükemmel biçimde kontrol edilebilir.

Daha Temiz ve Güçlü Kaynaklar

- **Yüksek Safılıkta Kaynaklar:** EDK'nın vakum ortamı, kirlenmeyen kaynaklar sağlar ve bu da daha güçlü ve güvenilir eklemlerle sonuçlanır.
- **Azaltılmış Hatalar:** EDK, daha az hata içeren kaynaklar üreterek ürünlerinizin genel kalitesini ve dayanıklılığını artırır.

Maliyet Etkin ve Ölçeklenebilir

- **Azaltılmış Son İşlem:** EDK'nın hassasiyeti ve temiz kaynakları, geniş çaplı son işlem gereksinimini azaltarak zaman ve maliyet tasarrufu sağlar.
- **Büyük Projeler İçin Ölçeklenebilir:** Küçük ölçekli uygulamalardan büyük endüstriyel projelere kadar, EDK üretim ihtiyaçlarınızı verimli biçimde karşılar.

Kanıtlanmış Uygulama Alanları

- **Havacılık ve Otomotiv:** Güç ve hassasiyetin kritik olduğu bileşenler için güvenilir çözüm sunar.
- **Tıbbi Cihazlar:** Tıbbi implantlar ve enstrümanlar için biyouyumluluk ve yapısal bütünlük sağlar.
- **Elektronik:** Hassas elektronik bileşenlerde güvenilir bağlantılar oluşturmak için idealdir.

Ürünler ve Teknoloji Alanları

ETAŞ'ın geliştirdiği ve sunduğu ürün ile teknoloji alanları şunlardır:

Elektron Demeti Kaynak Makinesi — miniEDK2000

ETAŞ'ın geliştirdiği miniEDK2000, Türkiye'nin ilk yerli üretim elektron demeti kaynak makinesidir. Akım, voltaj, hacim, vakum süresi ve serbestlik dereceleri gibi parametreler müşteri ihtiyacına özel olarak yapılandırılabilir. Giriş seviyesi modelinde (miniEDK200) güvenilir performans ve verimlilik bir arada sunulmaktadır. Makine, geleneksel TIG kaynağına kıyasla çok daha dar ısı tesiri bölgesi ve derin nüfuz özelliği sayesinde hassas endüstriyel uygulamalarda belirgin üstünlük sağlamaktadır.

Elektron Demeti Buharlaştırma (EBE)

İnce film kaplama ve malzeme buharlaştırma uygulamaları için geliştirilen EBE teknolojisi; yarı iletken, optik ve savunma sanayii başta olmak üzere yüksek hassasiyetli yüzey işleme gerektiren sektörlerle hitap etmektedir.

Elektron Demeti Sterilizasyon

Tıbbi ürün ve gıda sterilizasyonu için geliştirilen bu teknoloji, Türkiye'nin bağımsız ve yerli sterilizasyon kapasitesi oluşturmaya katkı sağlamayı hedeflemektedir.

Elektron Demeti X-Işını Üretimi

Elektron demeti kullanılarak Bremsstrahlung yöntemiyle X-ışını üretimi; endüstriyel muayene, tıbbi görüntüleme ve araştırma uygulamalarında kullanılabilir.

Destek Bileşenleri ve Sistemler

- Elektron üreteçleri (elektron tabancaları)
- Vakum ölçerler
- RF bileşenleri
- Parçacık hızlandırıcı çözümleri
- RF ve vakum özel çözümleri
- Teknik danışmanlık

Kapasite ve Uygulama Örnekleri

ETAŞ'ın yerli geliştirdiği EDK makineleri, aşağıdaki malzeme ve uygulamalarda başarıyla test edilmiştir:

Uygulama / Malzeme	Kalınlık	Özellik
SS 439 (Paslanmaz Çelik)	1,35 mm	Tam ve kısmi nüfuz kaynağı
Ti6Al4V – SS304 (Titanyum-Paslanmaz)	2 mm	Farklı metal birleştirme
Tam giricilik kaynağı	Malzemeye göre değişken	Yüksek yapısal bütünlük
Kısmi giricilik kaynağı	Malzemeye göre değişken	Kontrollü ısı etkisi

Stratejik Önemi

ETAŞ'ın varlığı, Türkiye açısından birden fazla stratejik boyutu olan önemli bir kırılma noktasını temsil etmektedir:

- **Teknoloji Bağımsızlığı:** Dünyada yalnızca birkaç ülkenin ürettiği elektron demeti hızlandırıcı teknolojisi, ETAŞ aracılığıyla artık Türkiye'de yerli olarak geliştirilebilmektedir.
- **İhracat Potansiyeli:** Yurt içi ihtiyacı karşılamamanın ötesinde, geliştirilen cihazların uluslararası pazara sunulması hedeflenmektedir.
- **Akademi-Sanayi İşbirliği:** TÜBİTAK projesiyle desteklenen ETAŞ, akademisyen kökenli kurucuların sanayi deneyimiyle birleştiği özgün bir model sunmaktadır.
- **Savunma ve Kritik Altyapı:** Elektron demeti teknolojisi, savunma sistemleri ve kritik altyapı uygulamalarında da kullanılabilir; ETAŞ bu alanda yerli kapasite oluşturmaktadır.
- **İnsan Kaynağı Geliştirme:** Şirket, bir yandan üretim yaparken diğer yandan yarının mühendis ve teknisyenlerini yetiştirmeyi misyonunun parçası olarak görmektedir.

EDK ile Lazer Kaynak: Karşılaştırmalı Değerlendirme

- Diğer kaynak yöntemlerine göre belirgin üstünlükleri olan elektron demeti kaynağı ve lazer kaynağını karşılaştırdığımızda şu temel fark öne çıkar: EDK, iyi odaklanmış bir elektron demeti kullanırken; lazer kaynağı eş fazlı fotonlardan yararlanır. Her iki yöntemde de elektronların veya fotonların kinetik enerjisi, metal yüzeyine çarptığında ısı enerjisine dönüşür. Ancak özellikle yüksek kaynak nüfuzu gerektiren uygulamalarda ve yansıtıcı metallerin kaynağında EDK, en üstün çözümü sunar.
- Lazer kaynağında fotonlar parlak veya yansıtıcı metal yüzeylerinde (örneğin bakır, alüminyum) kısmen geri yansıyabildiğinden enerji aktarımı düşer. EDK'da ise yüklü elektronlar yüzeyle doğrudan etkileşime girerek enerji transferini maksimize eder; bu sayede yansıtıcı malzemelerde dahi tutarlı ve derin kaynak elde edilir.

EDK ile Lazer Kaynağı — Teknik Karşılaştırma

Kriter	EDK (Elektron Demeti)	Lazer Kaynak
Enerji Kaynağı	Odaklanmış elektron demeti	Eş fazlı foton demeti
Yansıtıcı Metaller	Üstün performans	Enerji kaybı yaşanabilir
Kaynak Nüfuzu	Çok derin, yüksek kontrol	Sınırlı nüfuz
Vakum Gereksinimi	Gerekli (yüksek saflık sağlar)	Genellikle gerekli değil
Termal Bozulma	Çok düşük	Düşük-orta
Enerji Verimliliği	Yüksek	Orta

10.6 Türkiye'deki Mevcut Co-60 Gama Işınlama Tesisleri

Tesis	Konum / Kuruluş	Kapasite	Durum
Gammapak Sterilizasyon A.Ş.	Çerkezköy OSB, Tekirdağ — 1994	101 PBq (3.000.000 Ci) Co-60 — Türkiye'nin en yüksek kapasiteli gıda ışınlama tesisi	✓ Aktif — AB onaylı (2004); 7/24, 365 gün
TENMAK-NÜKEN Gama Tesisi	Kahramankazan, Ankara — 1993 (eski adı SANAEM)	140 kCi Co-60 — kutu tipi IV. Sınıf tesis	✓ Aktif — ağırlıklı tıbbi ürün ve araştırma amaçlı

✂ SANAEM kapanmadı — 2020 tarihli Cumhurbaşkanlığı Kararnamesiyle TENMAK (Türkiye Enerji, Nükleer ve Maden Araştırma Kurumu) çatısı altında NÜKEN adıyla yeniden yapılandı. Fiziksel tesis ve faaliyetler kesintisiz devam etmektedir.

Türkiye'de yılda yaklaşık 4.000 ton gıda ışınlanmaktadır. Başlıca ürünler:

- **Baharatlar** (kırmızı biber, karabiber, kimyon, kekik, nane) — toplam ışınlamanın ~%85–90'ı; ağırlıklı olarak AB ihracatı için
- **Bitkisel çaylar ve kurutulmuş sebzeler** (pırasa, soğan, sarımsak) — ~%5–8
- **Kırmızı et, tavuk, deniz ürünleri** — yılda yaklaşık 550 ton
- **Transit ürünler** (Çin sarımsak tozu vb.) — AB pazarı için

Ürün	Tipik Doz	Tahmini Fiyat (USD/ton)	Karşılaştırma AB
Baharat	5–10 kGy	80–130 USD/ton	100–150 USD/ton
Et / deniz ürünleri	1,5–4,5 kGy	100–160 USD/ton	120–180 USD/ton
Tıbbi sterilizasyon	25–50 kGy	Adet/kg bazlı	200–400 USD/ton eşd.

* Gammapak fiyat listesi kamuya açık değildir; yukarıdaki değerler bölgesel karşılaştırmaya dayalı tahmindir.

11. SONUÇ VE STRATEJİK ÖNERİLER

Elektron demeti hızlandırıcıları, elektrik alanla hızlandırılmış elektronların kontrollü iyonizasyon etkisine dayanır. Güvenli, kontrollü ve yüksek verimli bir teknolojidir. Küresel eğilim artış yönündedir. Çin ve ABD büyük yatırım yapmaktadır. Türkiye için bu alanda yerli üretim tesisinin kurulması teknolojik atılım, ekonomik kazanç ve stratejik güvenlik sağlayacaktır.

Elektron demeti hızlandırıcıları; besin güvenliği, medikal sterilizasyon, çevre teknolojileri ve yüksek katma değerli sanayi üretimi alanlarında geleceğin kritik altyapı teknolojilerinden biridir.

Türkiye'nin tungsten rezervi ve teknik insan kaynağı dikkate alındığında, yerli katot üretimi (W veya LaB₆) ve hızlandırıcı tasarımı mümkün görünmektedir.

Özetle:

Dünya genelinde besin ışınlama yeniden yükseliş eğilimindedir.

Elektron demeti teknolojisi gama sistemlerine göre daha güvenli ve kontrol edilebilirdir.

Çin ve ABD büyük ölçekli yatırım yapmaktadır.

Türkiye'de ciddi bir pazar potansiyeli mevcuttur.

Yerli ve millî bir 5–10 MeV endüstriyel hızlandırıcı üretim tesisi stratejik öneme sahiptir

 Tungsten ve diğer metaller bu teknolojiye neden önemlidir? Tungsten (W): Dünyanın en yüksek erime noktasına (3.422 °C) sahip metali olan tungsten, hızlandırıcılarda katot malzemesi olarak kullanılır. Yüksek sıcaklıklarda dahi stabil elektron emisyonu sağlar ve termal bozunmaya son derece dirençlidir. Türkiye, dünyada önemli tungsten rezervlerine sahip ülkeler arasında yer almakta olup bu metal hızlandırıcı katot üretiminde kritik bir hammadde niteliği taşımaktadır. Lantanyum Hekzaborür (LaB₆): Daha düşük iş fonksiyonuna sahip olduğundan daha az ısıtmayla yüksek elektron akısı üretir. Araştırma hızlandırıcılarında ve hassas uygulamalarda tungstene alternatif olarak kullanılır. Molibden (Mo): Bazı hızlandırıcı yapısal bileşenlerinde ve ısı kalkanlarında kullanılır. Yüksek sıcaklık direnci nedeniyle tercih edilir.

Besin Işınlamasında Doz Etkileri ve Işınlara Maddeye Giriciliği

Elektron Demeti (E-demet) ve Gama Işınlamasının Besin ve İnsan Hücreleri Üzerindeki Etkileri — WHO / IAEA / FDA Verileri

1. Temel Kavramlar: Doz Birimi ve Işınlama Kategorileri

Işınlama dozu, birim kütleye soğurulan enerji miktarıdır. Birimi Gray (Gy)'dir:

1 Gy = 1 Joule / kilogram. Pratikte kiloGray (kGy) kullanılır: 1 kGy = 1.000 Gy.

Karşılaştırma için: bir röntgen çekiminde insan ~0,0001 Gy (0,1 mGy) doz alır; tam vücut radyasyon tedavisinde ~2 Gy; güneş ışığının bir yıllık birikimi ~0,001 Gy.

Kategori	Doz Aralığı	Uygulama	WHO / Codex Durumu
Düşük Doz	0,05 – 1 kGy	Filizlenme önleme (patates, soğan), böcek dezenfeksiyonu, olgunlaşmayı geciktirme	✓ Onaylı / Güvenli
Orta Doz	1 – 10 kGy	Bakteri ve patojen azaltma (pastörizasyon eşdeğeri), et, deniz ürünleri, baharat	✓ Onaylı — Genel limite kadar güvenli
Yüksek Doz	> 10 kGy	Tam sterilizasyon — NASA uzay besinleri (44 kGy), hastane besinleri, tıbbi malzeme (25–50 kGy)	✓ 1997 WHO/FAO/IAEA: Üst sınır kaldırıldı — İyi üretim koşullarında güvenli

🔗 WHO Temel Kararı (1980, JECFI): '10 kGy'a kadar ısıtılan herhangi bir besin toksik tehlike oluşturmaz; bu nedenle toksikolojik test artık zorunlu değildir.' — 1997'de üst sınır tamamen kaldırılmış; iyi üretim koşullarında 10 kGy üzeri dozlar da güvenli bulunmuştur.

2. Hangi Dozdan İtibaren Besinde Değişiklik Başlar?

2. Hangi Dozdan İtibaren Besinde Değişiklik Başlar?

Isınma dozu arttıkça besinde gözlemlenen değişiklikler de artmaktadır. Aşağıdaki tablo bilimsel literatür ve WHO/IAEA verilerine göre eşik değerleri göstermektedir.

Doz Eşiği	Etkilenen Bileşen	Değişimin Türü	Bilimsel Değerlendirme
0,05 – 0,15 kGy	Canlı hücreler (filiz meristemi)	Filizlenme durur, solunuma baskı	Besin bileşiminde ölçülebilir değişiklik yok. Tamamen güvenli.
0,15 – 1 kGy	DNA (mikroorganizma ve böcek)	Parazit ve böcek sterilizasyonu, Vibrio %100 inaktivasyon	Besin makro besin öğelerinde değişim yok. Hassas vitaminlerde (A, B1, E, K) minimal kayıp.

1 – 3 kGy	Bakteri DNA'sı (Salmonella, E.coli)	%99,9 – %99,999 bakteri azalması	Protein yapısı korunur. Tiamin (B1) kaybı %2-5. Duyusal özellikler büyük ölçüde korunur.
3 – 7 kGy	Protein yapısı, yağ asitleri	Serbest radikal oluşumu — radioliz başlar. Myofibrillar protein çözünürlüğü artar.	İşlemden hemen sonra tüketilirse kısa süreli reaktif radikaller sorun olabilir; ancak radikaller saatler içinde dağılır. WHO: hâlâ güvenli.
7 – 10 kGy	Vitamin kompleksleri, aromatik moleküller	B1 (tiamin) kaybı %10–50'ye ulaşabilir. Koku/rengi değişimi bazı ürünlerde (et pembeliği).	Yalnızca tiamin önemli ölçüde azalabilir; karma diyetle toplam kaybın insan için önemi %2,3'ten düşük. Genel beslenme değeri korunur.
> 10 kGy	Makromolekül yapısı (protein, yağ)	2-alkilsiklobutanonlar ve furan gibi radioliz ürünleri oluşabilir. Tat ve doku değişimi belirginleşir.	WHO 1997: İyi üretim koşullarında güvenli. Hayvan çalışmaları (25–50 kGy) nesiller boyu toksisite, mutajenite veya teratojeni göstermemiştir.
> 25 kGy (sterilizasyon)	Tüm organizma DNA'sı	Prion hariç tüm mikroorganizma ve sporlar yok edilir. Radioliz ürünleri maksimum.	Yalnızca immün yetmezlik hastaları, astronotlar, uzun süreli depolama için kullanılır. Hayvan beslenme denemeleri (35 yıl) güvenliği desteklemiştir.

⚠ **Önemli:** Işınlama tamamlandıktan sonra gıdada hiçbir radyoaktivite kalmaz. 10 MeV altında elektron ve 5 MeV altında X-ışını ile ışınlanan besinlerde indüklenmiş radyoaktivite fiziğin temel yasaları gereği mümkün değildir. Oluşan serbest radikaller ise ortam sıcaklığında dakikalar-saatler içinde dağılır.

3. İnsan Hücrelerine Dolaylı Etki: Ne Zaman Risk Oluşur?

Temel soru: Işınlanmış besini yiyen insan etkilenir mi? **Bilimsel konsensüs şudur:** Işınlanmış besin radyoaktif değildir; onu tüketen insan ışınlanmaz. Asıl soru, radioliz ürünlerinin (ışınlama sırasında oluşan kimyasal bileşikler) insan hücrelerine etkisidir.

Bileşik / Etki	Doz Eşiği	İnsan Hücrelerine Potansiyel Etkisi	Uluslararası Kuruluş Değerlendirmesi
Serbest Radikaller (OH•, H•, H ₂ O ₂)	Her dozda oluşur	DNA iplik kırıklarına yol açabilir — ancak yalnızca IŞINLAMA ANI için; besin tüketildiğinde zaten dağılmış.	✓ Risk yok — Pişirme ve sindirimdeki serbest radikallerden farklı değil.

2-Alkilsiklobutanonlar (2-ACB)	> 0,5 kGy (yağlı gıdalarda)	In vitro çalışmalarda hücre zarı hasarı ve DNA kırığı gözlenmiştir. In vivo (hayvan) çalışmalar kesin hasarı doğrulamamıştır.	⚠ Değerlendirme devam ediyor — WHO güvenli buluyor; bazı araştırmacılar uzun dönem çalışma talep ediyor.
Furan	> 3 kGy	Piştirilmiş gıdalarda da doğal oluşur. Hayvanlarda karaciğer toksisitesi; insanlarda kesin kanser bağlantısı kurulamamıştır.	⚠ IARC: 2B — 'İnsanda kanserojen olabilir' (sınırlı kanıt). Kavrulmuş kahvede furan düzeyi ısıtılmış gıdadan yüksektir.
Vitamin Kaybı (B1, A, E, K)	> 1 kGy	Vitaminin biyoyararlanımının azalması → uzun vadede eksiklik riski (karma diyetle ihmal edilebilir).	✓ Karma diyetle toplam kayıp %2,3'ün altı. Klinik önemi yok.
Poliploid Hücre Artışı (İddia)	Tartışmalı (1975 çalışması)	1975 Hindistan: 0,75 kGy ışınlı buğday yiyen çocuklarda poliploid hücre artışı iddiası → Diyetle son verilince normale dönmüş.	✓ WHO: Çalışma metodolojisi yetersiz (yalnızca 100 hücre/çocuk sayıldı). Sonraki çalışmalarda doğrulanamadı.

👉 Genel konsensüs (WHO, FDA, IAEA, Codex Alimentarius, Avrupa Bilimsel Gıda Komitesi): 10 kGy'a kadar ısıtılan besinler insan sağlığı için güvenlidir. Hayvan beslenme deneyleri 35 yıl boyunca sürdürülmüş; mutajenite, teratojenite veya onkojenite gözlemlenmemiştir. 25–50 kGy ile sterilize edilmiş besinlerin nesiller boyu tüketimi dahi güvenli bulunmuştur.

4. Elektron Demeti ve Gama Işınlamasının Maddeye Giriciliği Karşılaştırması

Bu en kritik teknik farktır. Elektron demeti yüklü parçacıklar kullandığından maddede **belirli bir derinlikte durur**; gama ışınları ise foton (elektromanyetik dalga) olduğundan maddede, matematiksel üstel fonksiyon azalmayla kuramsal **olarak sonsuz derinliğe iner** (ama enerjisi azalarak).

Parametre	Düşük Enerjili E-demet (< 1 MeV)	Yüksek Enerjili E-demet (5–10 MeV)	Gama Işını (Co-60: ~1,25 MeV)	X-Işını (5–7,5 MeV Bremsstrahlung)
Nüfuz Derinliği (tek yön, yoğunluk ≈1 g/cm³)	< 1 cm (yüzey ısınlama)	3–4 cm (tek yön) 8 cm (çift yön)	25–30 cm (çift yön)	25 cm+ (çift yön)

Maksimum İşlenebilir Ürün Kalınlığı	İnce film, yüzey kaplama, küçük tanecikler	İnce et dilimleri, baharat, ambalajlı ürünler (< 8 cm)	Büyük palet, bütün karton kutu (30+ cm)	Büyük palet, karton kutu — gama ile benzer
Penetrasyon Prensipleri	Elektronlar yavaşlayarak tam durur — kesin sınır	Elektronlar yavaşlayarak tam durur — kesin sınır	Fotonlar üstel azalmayla ilerler — teorik sınır yok	Fotonlar üstel azalmayla ilerler — teorik sınır yok
Doz Hızı	Yüksek (saniyeler)	Çok yüksek (saniyeler)	Düşük (saatler)	Orta (dakikalar)
Homojen Doz Dağılımı	Yüzeyden içe gradient — heterojen	Yüzeyden içe gradient — orta homojenlik	Çok homojen (büyük hacimlerde)	Homojen (büyük hacimlerde)
Radyoaktif Kaynak	Yok	Yok	Var (Co-60)	Yok
Tipik Uygulama	Yüzey sterilizasyon, kaplama, folyo	Baharat, ince et, kümes hayv., ambalaj sterilizasyon	Kalın ürünler, palet ışınlama — büyük hacimli besin	Kalın ürünler, gama yerine geçen modern alternatif

5. Elektron Derinlik Girciliği MeV Enerjisine Göre

Elektronların derinlik girciliği için pratik kural: **1 MeV = yaklaşık 0,5 cm penetrasyon (su yoğunluğunda).**

Daha kesin ifadeyle: nüfuz derinliği (cm) $\approx$ Enerji (MeV) / 2.

Enerji (MeV)	Maks. Nüfuz (tek yön, cm)	Maks. Nüfuz (çift yön, cm)	İşlenebilir Ürün Örneği	Tipik Endüstriyel Kullanım
0,1 MeV (100 keV)	0,06 cm (0,6 mm)	0,1 cm (1 mm)	Ambalaj yüzeyleri, folyo, ince plastik	Baskı kütleme, yüzey kaplama
0,3 MeV (330 keV)	~0,06 cm (yüzey)	~0,1 cm	Baharat yüzeyi — sadece 60 µm derinlik	Düşük enerjili yüzey dezenfeksiyonu (LEEB)
1 MeV	~0,5 cm	~1 cm	İnce gıda dilimleri, küçük meyve	Tel/kablo çapraz bağlama, ince film

3 MeV	~1,5 cm	~3 cm	Tavuk göğsü, balık filetosu	Et ısınlama (ince), tıbbi ambalaj
5 MeV	~2,5 cm	~5 cm	Kıyma, baharat (250 g torba)	Baharat, kümes hayv. ısınlama
10 MeV (max. izin)	~4 cm	~8 cm	~1 kg et paketi, kalın baharat torbaları	Standart endüstriyel besin ısınlama — E-demet üst sınırı
Gama (Co-60) ~1,25 MeV foton	10–15 cm (tek yön)	25–30 cm (çift yön)	Büyük et paletleri, tam karton kutular	Üstel fonks.azalma

🔑 **Kilit Gerçek:** 10 MeV E-demet ile çift taraflı ısınlamada maksimum ~8 cm penetrasyon elde edilir (su yoğunluğunda). Gama ışını (Co-60) ise teorik olarak sınırsız — pratik olarak onlarca santimetre — nüfuz eder. Bu nedenle kalın ürünler ve palet ısınlama için gama veya X-ışını daha uygundur; ince ve orta kalınlıktaki ürünler için E-demet yeterli ve daha güvenlidir.

6. Özet: E-demet ile Gama Işınlaması — Güvenlik ve Penetrasyon Açısından

Konu	E-demet (Elektron Demeti)	Gama Işını (Co-60)
Nüfuz Derinliği	Sınırlı: 10 MeV'de çift yön maks. 8 cm (yoğunluk 1 g/cm ³)	Derin: Çift yön 25–30 cm; büyük palet mümkün
Işınlamanın Durması	Kesin durur — elektronların kinetik enerjisi tükenir	Üstel azalır ama tamamen durmuyor — küçük fraksiyon her zaman devam eder
Besin Radyoaktivitesi	Sıfır (< 10 MeV'de)	Sıfır (Co-60 enerjisi nükleer aktivasyon eşliğinin altında)
Serbest Radikal Oluşumu	Her iki yöntemde de oluşur — saatler içinde dağılır	Her iki yöntemde de oluşur — saatler içinde dağılır

Besin Güvenliği (WHO)	✓ Güvenli — 10 kGy altı kesinlikle; 10 kGy üzeri iyi üretim koşullarında	✓ Güvenli — 10 kGy altı kesinlikle; 10 kGy üzeri iyi üretim koşullarında
İnsan Hücrelerine Dolaylı Etki	Pratik doz aralığında ihmal edilebilir — radioliz ürünleri pişirilmiş gıdalardan fazla değil	Pratik doz aralığında ihmal edilebilir — radioliz ürünleri pişirilmiş gıdalardan fazla değil
Yüksek Doz (> 10 kGy) Özel Durumu	Tiamin kaybı belirginleşir; furan ve 2-ACB oluşabilir; ancak hayvan çalışmaları nesiller boyu güvenliği göstermiştir	Tiamin kaybı belirginleşir; furan ve 2-ACB oluşabilir; ancak hayvan çalışmaları nesiller boyu güvenliği göstermiştir

KAYNAKLAR /I/ 2 YZ

Elektron Demeti Hızlandırıcı Teknolojisi

Ana kaynaklar:

World Health Organization — Food Irradiation Reports

Food and Agriculture Organization — Food Irradiation Guidelines

U.S. Food and Drug Administration — Irradiation of Food Regulation

International Atomic Energy Agency — Industrial Electron Accelerators

Rahman, M.S. (2007). Handbook of Food Preservation

Stefanova et al. (2010). Food Irradiation Review

Codex Alimentarius Commission — Codex Standard for Irradiated Foods (CODEX STAN 106-1983)

TENMAK-NÜKEN: Türkiye Enerji, Nükleer ve Maden Araştırma Kurumu, Nükleer Enerji Enstitüsü <https://www.tenmak.gov.tr/nukleer-enerji-arastirma-enstitusu>

TARLA – Türk Hızlandırıcı ve Işınım Laboratuvarı <https://tarla-fel.org>

A.Ü. HTE - Ankara Üniversitesi Hızlandırıcı Teknolojileri Enstitüsü <https://hte.ankara.edu.tr>

A.Ü. PALS – Ankara Üniversitesi Parçacık Hızlandırıcıları ve Işınım Kaynakları Araştırma Grubu <https://pals.ankara.edu.tr>

ODTÜ İVMER - Uzay ve Hızlandırıcı Teknolojiler Uygulama ve Araştırma Merkezi <https://ivmer.metu.edu.tr>

ETAŞ — Elektron Demeti Kaynağı (EDK) Teknoloji Sayfası: | ETAŞ Elektron Teknolojileri A.Ş. <https://www.elektronteknolojileri.com>

Ve Makaleler:

1. Cleland, M.R. & Galloway, R.A. (2006). Industrial Applications of Electron Accelerators. EPAC 2006, CERN-AB-2006-056. <https://cds.cern.ch/record/1005393/files/p383.pdf>

2. Berejka, A.J. & Cleland, M.R. (2008). Industrial Electron Beam Processing. IAEA Working Material, Vienna. https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/P1433_CD/datasets/presentations/SM-EB-26.pdf

3. IAEA (2011). Industrial Radiation Processing with Electron Beams and X-Rays. IAEA Radiation Technology Series, Vienna. <https://www.irradiationpanel.org/app/download/3792773/IAEA+Guide+Industrial+Radiation+Processing+2011.pdf>

4. Hamm, R.W. & Hamm, M.E. (eds.) (2012). Industrial Accelerators and Their Applications. World Scientific Publishing, Singapore. ISBN 978-981-4307-04-8.

5. IAEA (2010). Use of Mathematical Modelling in Electron Beam Processing: A Guidebook. IAEA Radiation Technology Series No. 1, Vienna. https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1474_Web.pdf
6. IAEA (2004). Emerging Applications of Radiation Processing. IAEA-TECDOC-1386, Vienna. https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te_1386_web.pdf
7. Kume, T. et al. (2009). Status of food irradiation in the world. **Radiation Physics and Chemistry**, **78(3)**, 222–226. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2009.03.062>
8. Chmielewski, A.G. (2006). Electron Beam Processing — What are the Limits? IAEA International Symposium on Radiation Technology, AP/INT-03, Vienna. https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/P1433_CD/datasets/papers/ap_int-03.pdf
9. Schissel, S. (2024). The Cost and Value of Electron Beam. UV+EB Technology Magazine, Q3 2024, PCT Ebeam and Integration LLC. <https://uvebtech.com/articles/2024/the-cost-and-value-of-electron-beam/>
10. IARC at Fermilab (2024). Electron Beam Applications. Illinois Accelerator Research Center, Fermi National Accelerator Laboratory. <https://iarc.fnal.gov/electron-beam-applications/>

İŞINLANMAYLA İLGİLİ KAYNAKLAR

WHO Technical Report Series 890 (1999),
FAO/IAEA/WHO Joint Expert Committee (JECFI 1980),
FDA Food Irradiation Overview,
Codex Alimentarius General Standard for Irradiated Foods (CODEX STAN 106-1983), IFST Information Statement on Food Irradiation (2023), PMC: Control of Foodborne Biological Hazards by Ionizing Radiations,
PMC: Meat Irradiation Review (2023),
NextBeam: Depth-Dose Curves and E-dose Penetration (2025),
Korea Science: Bologna Sausage E-dose vs X-ray (2014),
NCBI: Sterilization Using Radiation Modalities.