

Gama ışınları ile ışınlanmış kurşun-alkali-silika camın dozimetrik kullanımı

Nilgün DOĞAN BAYDOĞAN*, A. Beril TUĞRUL

İTÜ Nükleer Enerji Enstitüsü, 34469, Ayazağa, İstanbul

Özet

Kurşun-alkali-silika cam örnekleri 1-36 kGy arasında ışınlanarak, gama radyasyonuna maruz bırakılmıştır. Bu çalışmada, gama ışın kaynağı olarak, Co-60 radyoizotop kaynak kullanılmıştır. Gama ışınlarına maruz kalmış kurşun-alkali-silika camların, soğurduğu doz seviyesine bağlı olarak, renklerinin giderek koyulaştığı belirlenmiştir. Kurşun-alkali-silika cam yapının radyasyonla uyartılması sonucu, bu camların, görünür bölgedeki, geçirgenlik, yansıtıcılık ve soğurma değerlerinin değiştiği tespit edilmiştir. Optik özelliklerdeki değişimlerin incelenmesi, elektromanyetik spektrumun, 380-1500 nm dalgaboyu aralığına düşen bölgesinde yapılmıştır. Işınlanmış camlar ile ışınlanmamış camların optik parametrelerinde meydana gelen değişimler karşılaştırılarak, farklı doz seviyelerinde ışınlanan, kurşun-alkali-silika camlarının, dozimetre olarak kullanılabilirliği incelenmiştir.

Anahtar kelimeler: Cam dozimetreler, dozimetri, kurşun-alkali-silika cam, soğurulan doz.

Dosimetric evaluation of gamma doses using irradiated lead-alkali-silicate glass

Abstract

Dosimetric evaluation is important especially at the high dose levels. Glass dosimeters are used in dosimetry in several high-level exposure applications, employing mainly spectrophotometric or densitometric analysis of colour-center formation. The chemical composition of lead-alkali-silicate glass was determined using a wavelength dispersive X-ray fluorescence spectrometer. The balance between the ionic forms of the glass impurity atoms, which are transition metals, determines the glass colour to the transition elements ferric iron, titanium and nickel, and post transition elements like antimony. The radiation-induced absorption in the visible spectral region in Pb-containing glasses undergoes rapid thermal and optical bleaching, provided the glass does not contain alkali ions. The addition of just a few percent alkali ions stabilises the absorption. Lead-alkali-silicate glass samples were irradiated with 1-36 kGy dose levels using a Co-60 radioisotope source. The colour of the lead-alkali-silicate glass turned to brownish orange with absorbed dose. Radiation-induced changes in the properties of visible light transmittance and absorbance were examined between wavelengths of 380 and 1500 nm using a spectrophotometer. Changes in the optical density were determined and compared with those of unexposed glasses. The optical density was investigated for different dose levels in this study. The optical density curves indicated the strong radiation induced absorption in a band around 700 nm wavelength.

Keywords: Absorbed dose, dosimetry, glass dosimeter, lead-alkali-silicate glass.

Yazışmaların yapılacağı yazar: Nilgün DOĞAN BAYDOĞAN. dogan@nukleer.itu.edu.tr; Tel: (212) 285 34 92.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Nükleer Enerji Enstitüsü'nde tamamlanmış olan "Farklı camların radyasyon karşısındaki davranışlarının incelenmesi, dozimetrik amaçlı kullanımlarının değerlendirilmesi ve yeni bir korelasyon " adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 15.10.2002 tarihinde dergiye ulaşmış, 22.12.2002 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 31.05.2003 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

Giriş

Yüksek dozlardaki ışınlamalarda, dozimetrik değerlendirmeler özellikle önem taşımaktadır. Bu amaçla çeşitli cihazlar geliştirilmiştir. Tıp ve gıda sanayinin yanısıra, yüksek doz seviyelerindeki ışınlamaların yapıldığı diğer endüstriyel alanlarda, cam dozimetrelerin kullanımı, son yıllarda, giderek ilgi çekici hale gelmektedir. Işınlanan soda-kireç-silika camlarının rengi, camın soğurduğu radyasyon dozuna bağlı olarak kahverenginin tonlarına dönüştüğü için bu tür camlar, tıbbi alanlarda radyasyon dozimetresi olarak kullanılabilir (Ezz-Eldin, F.M., 1994). Diğer bazı cam sistemlerinde de, soğurulan doza bağlı olarak optik yoğunluğun ölçülmesi ile yüksek dozlar için uygun dozimetreler elde edilmiştir (McLaughlin, 1989).

Kurşun-alkali-silika camlarda bulunan kurşun oksit, camın yumuşama noktasını kireçten daha yüksek bir oranda düşürmekte, buna karşın kırılma indisi ve camın, ışığı renklerine ayırma gücünü yükseltmektedir. Yüksek elektriksel dirence sahip bir cam yaklaşık % 25 PbO ve % 6-7 oranlarında Na₂O ve K₂O içermektedir; yüksek bir kırılma indisi için cam yaklaşık %65 oranında PbO içermelidir (Uhlman ve Kreidl, 1991; Vogel, 1994; Doremus, 1994; Amstock, 1997).

Spektrofotometrik verilere bağlı, optik yoğunluk değerlendirmeleri, yüksek dozlardaki uygulamalarda, sonuçların yorumlanması açısından, önem taşımaktadır. Uygulanan radyasyon dozundaki artışa bağlı olarak, optik yoğunlukta artış söz konusudur. Böyle bir çalışmada, artan doz seviyesine bağlı olarak, camın rengi giderek koyulaşmaktadır (Doğan ve Tuğrul, 2001/a). Bu

çalışmada, farklı doz seviyelerinde ışınlanan kurşun-alkali-silika camların dozimetrik amaçlı kullanılabilirliği incelenmiştir

Deney ve metod

10 mm kalınlıktaki kurşun-alkali-silika camlar, Şişecam Araştırma Merkezi'nden temin edilmiş olup, bu camların kimyasal analizleri, X-Işını Floresans Tekniği (XRF) ile yapılmıştır. İncelenen kurşun-alkali-silika camların kimyasal analiz sonuçları Tablo 1'de görülmektedir.

Cam örneklerin ışınlanmasında, radyasyon kaynağı olarak, 9.18 Ci aktiviteye sahip, bir Co-60 radyoizotop kaynak kullanılmıştır. Kurşun-alkali-silika camlar, Co-60 radyoizotop kaynağın karşısına, panoramik olarak yerleştirilerek, gama ışınlarına maruz bırakılmıştır. Böylelikle, bu cam örneklerin, 1 ile 36 kGy arasında 10 farklı doz seviyesinde ışınlanmaları sağlanmıştır.

Gama ışınlarına maruz kalan camların, dalgaboyuna bağlı, ışık geçirgenliği ve yansıtıcılığı, Şişecam Araştırma Merkezi'nde mevcut bulunan, Perkin Elmer Lambda-9 Spektrofotometre kullanılarak belirlenmiştir.

Tablo 2'de, kurşun-alkali-silika camlardaki mevcut elementlerin, gama ışınları karşısındaki davranışları, ayrıntılı olarak incelenmektedir. Bu tabloda, kurşun-alkali-silika camlardaki mevcut elementlerin (Co-60 radyoizotopunun iki gama enerji pikinin ortalaması olan) 1.25 MeV enerjili fotonlar karşısındaki davranışı göz önüne alınarak değerlendirilmeler yapılmıştır.

Tablo 1. Kurşun-alkali-silika camların kimyasal analiz sonuçları.

Cam Tipi	Kimyasal Kompozisyon (% Ağırlık)									
	SiO ₂	PbO	K ₂ O	Na ₂ O	B ₂ O ₃	SbO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	NiO	TiO ₂
Kurşun- Alkali- Silika Cam	59.97	24.00	13.00	2.00	1.00	0.18	0.01	0.008	0.0003	0.008

Tablo 2. Kurşun-alkali-silika camdaki elementlerin 1.25 mev enerjili foton soğurma katsayıları.

Element	Co-60 Radyoizotopu için foton soğurma katsayıları	
	Kütleli soğurma katsayısı (cm ² /g)	Lineer soğurma katsayısı (1/cm)
⁵ B	0.04160	0.0970
²² Ti	0.05035	0.2415
⁵¹ Sb	0.04950	0.3425
²⁸ Ni	0.05255	0.4930
²⁶ Fe	0.05125	0.4270
¹⁹ K	0.04425	0.0380
¹⁴ Si	0.05420	0.1350
¹² Na	0.05190	0.0536
¹³ Al	0.05235	0.1505
⁸² Pb	0.06125	0.6945
⁸ O	0.05415	7.67x10 ⁻⁵
Toplam	0.56335	2.6726

Camların ışınlanması sırasında, Co-60 radyoizotopu kullanıldığından, cam yapısındaki elementlerin (Co-60 radyoizotopunun iki gama enerji pikinin ortalaması olan) 1.25 MeV enerjili fotonlar karşısında, foton soğurma katsayıları, lineer ve kütle soğurma katsayıları, Tablo 2'de ayrı ayrı hesaplanmıştır (Clason, 1958; ASNT, 1985; Lide, 1995).

Camlar için CEN tarafından belirtilen optik özellikler tanımlanmıştır. Bu bağlamda, görünür bölge ve solar bölgeye ait geçirgenlik, yansıtıcılık ve soğurma değerleri ile morötesi bölge için geçirgenlik değerleri, CEN standartlarında belirtilmektedir (EN 410, 1998).

Işık geçirgenliği

Işık geçirgenliği; (τ_v) 380-780 nm dalgaboyu arasında gelen ışığın, camın yüzeyine dikey olarak düşmesi halinde, camın geçirdiği ışık şiddetinin, gelen ışık şiddetine oranıdır (TSE, 1993). Camın ışık geçirgenliği (τ_v), aşağıdaki denklemden hesaplanabilmektedir (EN 410, 1998).

$$\tau_v = \frac{\sum_{\lambda=380}^{\lambda=780} D_{\lambda} \tau(\lambda) V(\lambda) \Delta\lambda}{\sum_{\lambda=380}^{\lambda=780} D_{\lambda} V(\lambda) \Delta\lambda} \quad (1)$$

10 nm' lik dalgaboyu aralıklarındaki $D_{\lambda} V(\lambda) \Delta\lambda$ için değerler, Tablo 3'te belirtilmekte ve

$$\sum D_{\lambda} V(\lambda) \Delta\lambda = 1 \quad (2)$$

olduğu ifade edilmektedir (EN 410, 1998). Spektrofotometreden ölçülen değer, ilgili Avrupa Standartlarında belirtildiği şekilde, Tablo 3 kullanılarak, Denklem 1 ve Denklem 3'e yerleştirilmiştir.

$$\rho_v = \frac{\sum_{\lambda=380}^{\lambda=780} D_{\lambda} \rho(\lambda) V(\lambda) \Delta\lambda}{\sum_{\lambda=380}^{\lambda=780} D_{\lambda} V(\lambda) \Delta\lambda} \quad (3)$$

Işık yansıtıcılığı

Işık yansıtması (ρ_v), 380-780 nm dalgaboyları arasında gelen ışığın camın yüzeyine dikey olarak düşmesi halinde, camın yansıttığı ışık şiddetinin, gelen ışık şiddetine oranıdır (TSE, 1993). Camın ışık yansıtıcılığı (ρ_v) ifadesi, kullanılarak hesaplanabilmektedir.

D_{λ} , $V(\lambda)$ ve $\Delta\lambda$ ile ilgili tanımlamalar ışık yansıtıcılığı için aynen geçerlidir. $\rho(\lambda)$, camın spektral yansıtıcılığı olarak tanımlanmaktadır (EN 410, 1998).

Işık soğurması, α_v , Eşitlik 1-3 kullanılarak hesaplanabilmektedir.

$$\tau_v + \rho_v + \alpha_v = 1 \quad (4)$$

Tablo 3. Görünür bölge için değerler (CEN, 1992; EN 410, 1998).

λ (nm)	$D_\lambda V(\lambda) \Delta\lambda \times 10^2$	λ (nm)	$D_\lambda V(\lambda) \Delta\lambda \times 10^2$	λ (nm)	$D_\lambda V(\lambda) \Delta\lambda \times 10^2$
380	0.0000	520	7.0523	660	0.4612
390	0.0005	530	8.7990	670	0.2485
400	0.0030	540	9.4427	680	0.1255
410	0.0103	550	9.8077	690	0.0536
420	0.0352	560	9.4306	700	0.0276
430	0.0948	570	8.6891	710	0.0146
440	0.2274	580	7.8994	720	0.0057
450	0.4192	590	6.3306	730	0.0035
460	0.6663	600	5.3542	740	0.0021
470	0.9850	610	4.2491	750	0.0008
480	1.5189	620	3.1502	760	0.0001
490	2.1336	630	2.0812	770	0.0000
500	3.3491	640	1.3810	780	0.0000
510	5.1393	650	0.8070		

Optik yoğunluk, camdaki hem soğurma ve hem de yansıtıcılık etkisini, aynı anda ifade edebilmesi açısından, çeşitli durumlarda tercihen kullanılmaktadır (Tooley, 1960/a; Tooley, 1960/b).

Uygulama açısından, optik yoğunluk eğrilerinin kullanımının, bir takım kolaylıklar getirmesi mümkün olabilir. Bu nedenle, sadece soğurma (α_v) yerine, yansıtıcılığı (ρ_v) da içeren optik yoğunluk (D), ifadesinin kullanımının, camdaki rengin daha sağlıklı açıklanabilmesi açısından, uygun olacağı düşünülmüştür (Tooley, 1960/a; 1960/b).

$$D = \alpha_v t \log_{10} e - \log_{10} (1 - \rho_v)^2 \quad (5)$$

DeneySEL sonuçlar

Gama ışınlarına maruz kalan, kurşun aluminoborat ve kurşun borat camlar ile kurşun alumina fosfat ve kurşun silikat camlarda, birbirine benzer 825 nm civarında bir bant oluştuğu görülerek, bu bandın, Pb^{2+} iyonunun Pb^{3+} iyonuna yükseltgenmesiyle oluştuğu tespit edilmiştir (Sharaf v.dig., 1994).

Aluminyum ve titan elementlerinin bulunmadığı camların, gama ışınları ile uyartılması sonucu, 505 ve 710 nm civarında iki bant görülmektedir. Camların gama ışınları ile uyartılması sonucu, 505 ve 710 nm civarında meydana gelen bu iki bant,

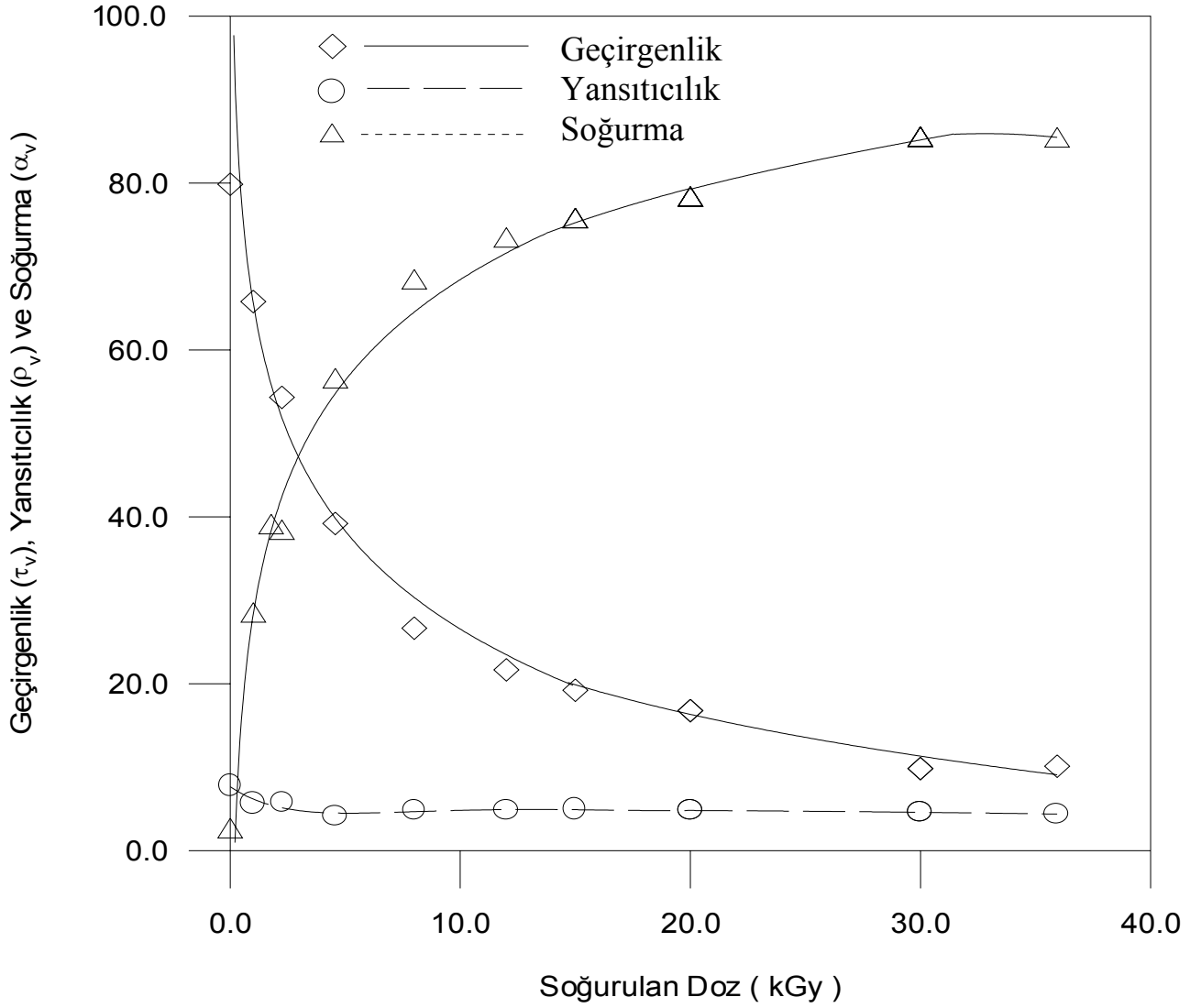
Fe^{2+} iyonlarının Fe^{3+} iyonlarına yükseltgendiğini ifade etmektedir (Ezz El-Din v. dig., 1988).

Camlardaki, spektrokimyasal analizlerde, % 0.008 Al_2O_3 miktarının bile spektroskopik ölçümleri etkilemesi söz konusu olabilmektedir. Yaklaşık % 0.02 Al_2O_3 mevcudiyetinde, alüminyuma ait oluşan soğurma ise, yaklaşık 520 nm'de görülebilmektedir (Lell, 1960).

Böylece, radyasyonla uyartılarak, renk merkezlerinin oluşturulması söz konusudur (Ezz El-Din v. dig., 1988). Fe^{2+} iyonlarının Fe^{3+} iyonlarına yükseltgenmesinin, camlar tarafından soğurulan dozun artışıyla, artmakta olduğu düşünülmektedir (Doğan ve Tuğrul, 2001/a).

Şekil 1'de, kurşun-alkali-silika camların, görünür bölgedeki ışık geçirgenliği, yansıtıcılığı ve soğurma değerlerindeki değişimler, Eşitlik (1)-(3) kullanılarak hesaplanmıştır.

Şekil 2'de, kurşun-alkali-silika cam yapıda yer alan iyonların, uygulanan yüksek dozlardaki gama radyasyonu sonucu, redoks kuralları çerçevesinde, çeşitli indirgenme ve yükseltgenmeye uğradıkları düşünülmektedir.

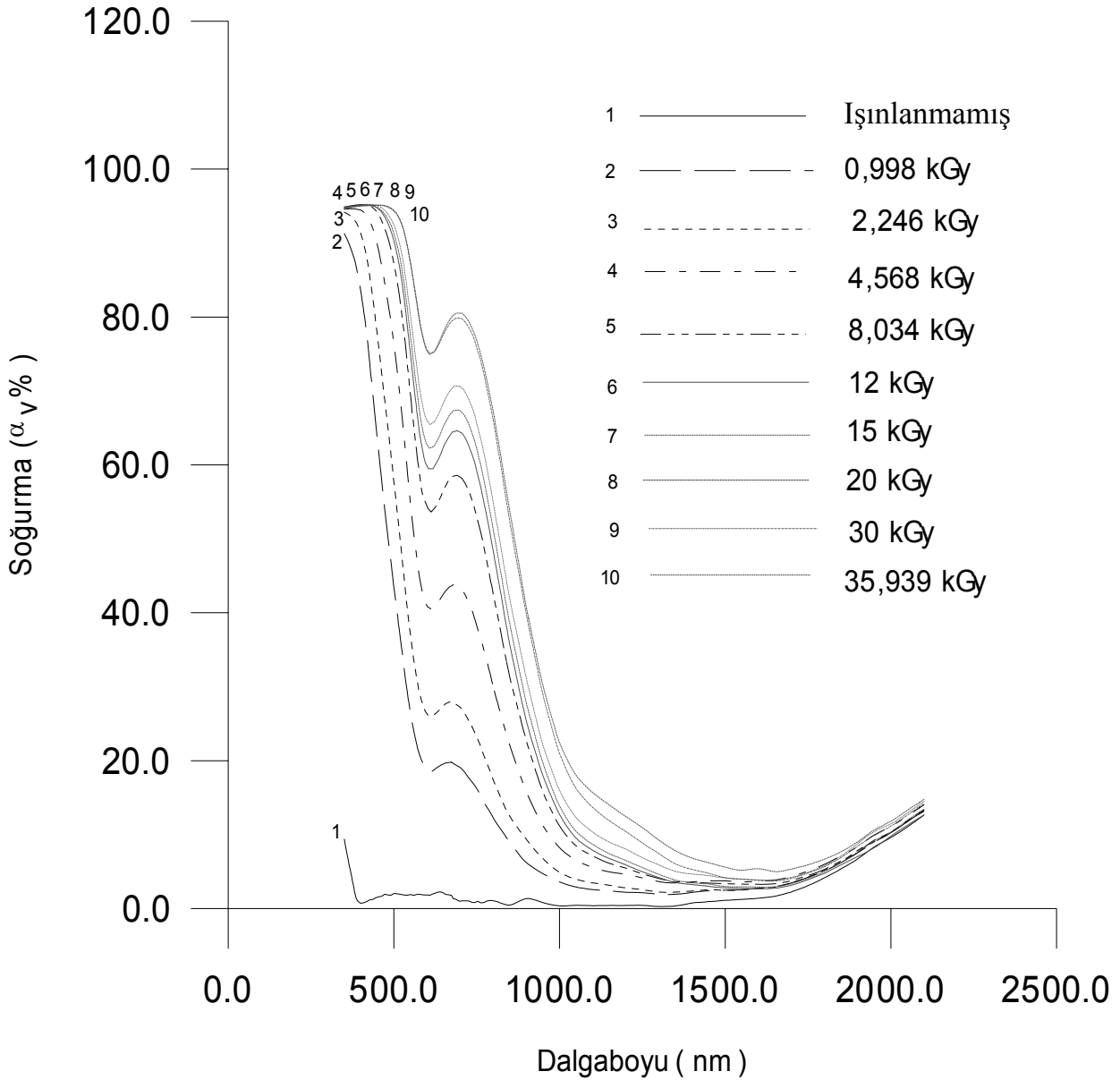


Şekil 1. Görünür ışık için ışınlamadan önce ve sonra kurşun-alkali-silika camların geçirgenlik, yansıtıcılık ve soğurma eğrileri.

Bu bağlamda, spektrumun başlangıçta incelenen bölgesindeki kısa dalga boylarında, oluşan soğurma, 700 nm civarında karakteristik bir şekilde artmaktadır (Doğan ve Tuğrul, 2001/b, 2001/c).

Kurşun-alkali-silika cam yapısında, gama radyasyonun uyarttığı renk merkezlerinin oluşumuna neden olan iyonların tespit edilmesi, Şekil 3'te görülen, optik yoğunluk bantlarının yorumlanabilmesi açısından, büyük önem taşımaktadır (Doğan ve Tuğrul, 1996/a, 1996/b, 1999, 2000). Böylece, camda meydana gelen optik değişimler optik yoğunluğun özellikle belirli dalgaboylarında artmasında, etkin olmaktadır.

Şekil 3'te, 1 kGy gama ışınlarının etkisinde kalmış, kurşun-alkali-silika camlardaki optik yoğunluk artışı tespit edilmiştir. Uygulanan dozun artışıyla, bu dalga boyu civarındaki optik yoğunluk giderek artmaktadır. Yüksek dozlarda gama ışınlarına maruz kalmış, kurşun-alkali-silika camlarda, 700 nm civarında, karakteristik bir şekilde, optik yoğunluk bantları meydana gelmektedir. 1-4.5 kGy arasında doz almış kurşun-alkali-silika camlarda, 700 nm civarında bu camlara özgü, karakteristik bir bant belirlemektedir. Ayrıca, 8 kGy ve üstündeki dozlarda bu bandın belirginleştiği görülmektedir. Radyasyona maruz kalmış camlarda, 700 nm civarında, optik yoğunluktaki şiddetli artışın nedeni,



Şekil 2. Işınlamadan önce ve sonra kurşun-alkali-silika camların görünür bölgedeki soğurma spektrumu

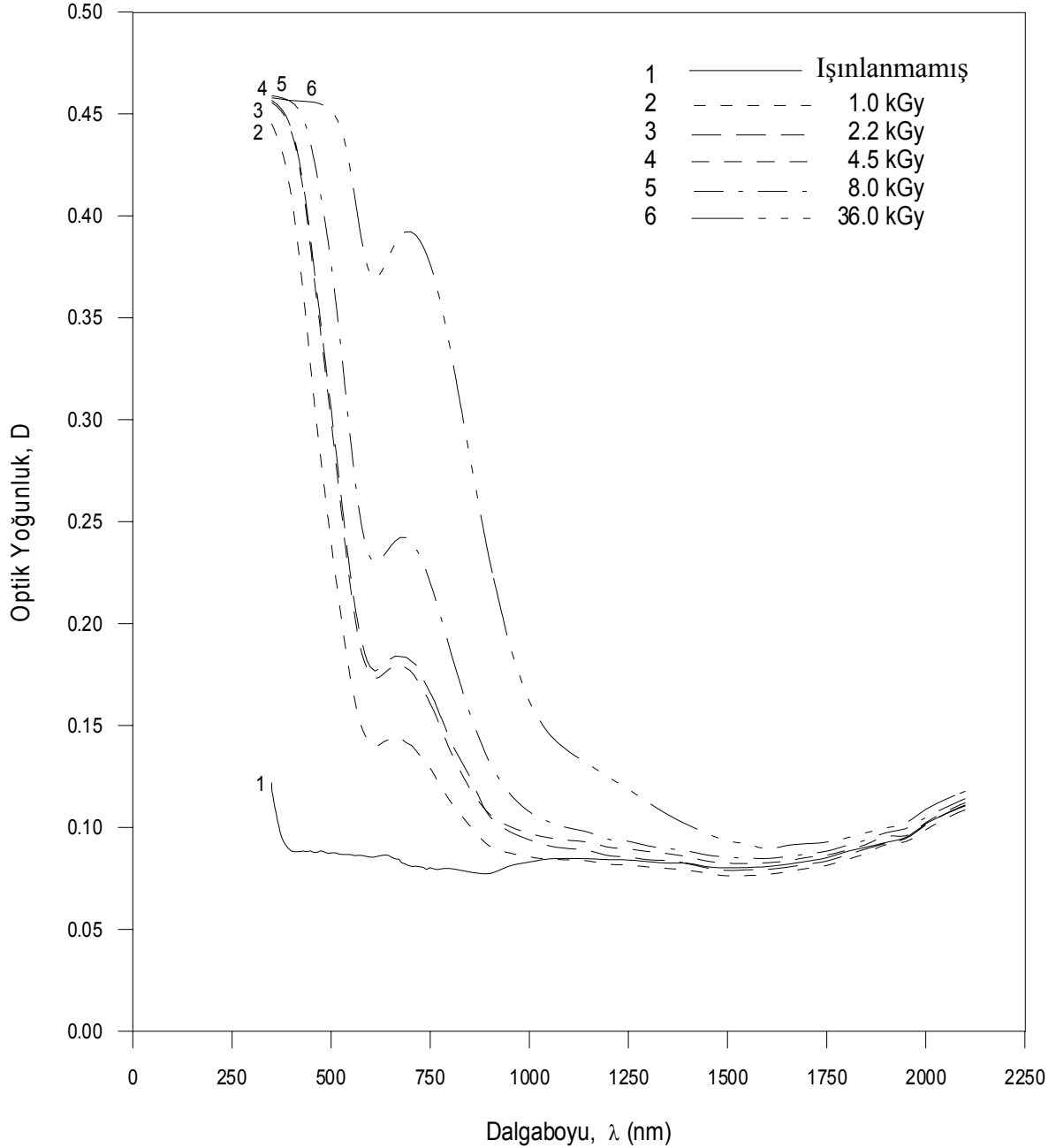
elektromanyetik spektrumdaki bu dalga boyu civarında oluşan görünür bölgedeki soğurmanın artışıdır.

Şekil 4'te, camın soğurduğu doza bağlı olarak, 700 nm dalgaboyundaki optik yoğunluk değişimi görülmektedir. Bu grafiğe göre, kurşun-alkali-silika camlarda, özellikle

35 kGy civarında, camın soğurduğu gama radyasyonunun doyunluğa ulaştığı görülmektedir.

Sonuç

Gama radyasyonu ile ışınlanan camlarda örneklerde, açık sarımsı renkten, daha koyu kahverengiye dönüşen, bir renk değişiminin olduğu tespit edilmiştir. Radyasyonla uyartılan kurşun-alkali-silika cam yapıda, belirli dalga boylarında, optik değişimler meydana gelmiştir. Bu nedenle, radyasyonla uyartılma sonucu renk merkezlerinin oluşumunun artmasıyla, camda optik yoğunluk artmıştır.



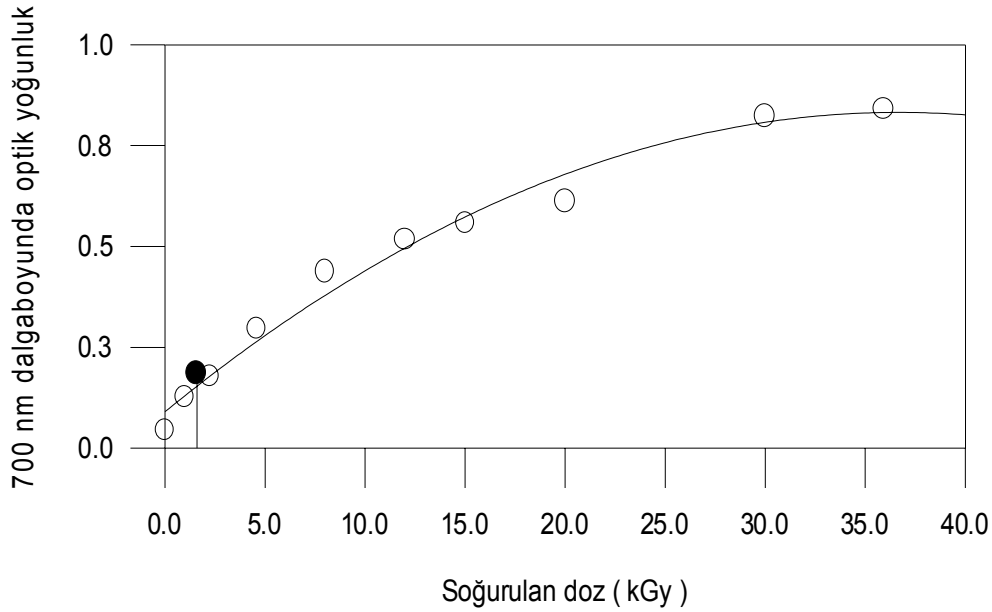
Şekil 3. Kurşun-alkali-silika camların, dalgaboyuna bağlı, optik yoğunluk değişimleri.

Yüksek dozlardaki gama ışınları karşısında, cam örneklerdeki, uyarılan optik yoğunluk bantları, uyarılmanın söz konusu olduğu dalga boylarındaki fotonların soğurulmasına neden olmaktadır. Böylece, gama radyasyonuna maruz kalan, camlarda, 700 nm dalga boyunda, optik yoğunluktaki meydana gelen belirgin değişimin nedeni açıklanabilmektedir.

10 mm kalınlıktaki kurşun-alkali-silika cam dozimetrelerin, tahmini doz hatasının yaklaşık % 5'in altında olduğu tespit edilmiştir.

Dolayısıyla, kolay kullanım açısından 10 mm kalınlıktaki kurşun-alkali-silika camların çizilen kalibrasyon eğrisi bağlamında dozimetrik amaçlı kullanımlarda uygun olabileceği düşünülmektedir.

Kurşun-alkali-silika camların dozimetrik amaçlı kullanımı; kolay taşınabilmesi, küçük oluşu, kolayca temin edilebilmesi ve fiyatının ekonomik oluşu, gıda ışınlamaları, radyosterilizasyon işlemleri ve çeşitli medikal



Şekil 4. Işınlamadan önce ve sonra 700 nm'deki kurşun-alkali-silika camda soğurulan doz.

amaçlı uygulamalarda ayrıca, tercih nedeni olabilir. Cam dozimetrelerin diğer bir tercih nedeni; enerjiden bağımsızdır, katı haldedir ve sıvı temizleyiciler yardımıyla kolaylıkla temizlenebilmektedir.

Semboller

- D : Optik Yoğunluk
D_λ : D₆₅ aydınlatmasının göreceli spektral dağılımı
D₆₅ aydınlatması : Uluslararası Aydınlatma Komisyonunun (International Commission on Illumination - ICI) resmi olarak önerdiği standart aydınlatma.
t :Malzeme kalınlığı
V(λ) :Spektral ışın verimi
α_v :Optik Soğurma
ρ_v :Optik Yansıtıcılık
τ(λ) :Camdaki spektral geçirgenlik
Δλ :Dalgaboyu aralığı

Kaynaklar

- Amstock, J., S., (1997). *Handbook of Glass In Constructions*, 24-30, Mc Graw-Hill, Printed and bound by Quebecor/Fairfield.
ASNT, (1985). *Radiography and Radiation Testing, in Nondestructive Testing Handbook*, 2nd. ed., American Society for Nondestructive Testing, 3, 837-978, USA.

CEN-Comite Europeen De Normalisation-European Committee for Standardization, (1992). *CEN/TC129/WG9/N.4E Rew.7*, Glass in Building-Determination of Light Transmittance-Solar Direct Transmittance-Total Solar Energy Transmittance And Ultraviolet Transmittance, and Related Glazing Characteristics.

Clason, W. E., (1958). *Elsevier's Dictionary of Nuclear Science and Technology*, Elsevier Publishing Company, 2, 369Amsterdam.

Doğan, N. ve Tuğrul, A. B., (1996/a). Investigation of Soda Glasses that are Exposed by Co-60, *Proceedings International Symp. on Glass Problems*, 2, 185-191, Istanbul, Turkey.

Doğan, N. ve Tuğrul, A. B., (1996/b). Soda Camlarının Elektromagnetik Radyasyon Karşısındaki Davranışlarının İncelenmesi, *7. Nükleer Bilimler ve Teknoloji Kongresi*, 1, 271-278, Istanbul, Turkey.

Doğan, N. ve Tuğrul, A. B., (1999). An Investigation of the Radiation Effect on Lead Glass by Different Radiation, *Jahrestagung Kerntechnik'99-Annual Meeting on Nuclear Technology'99, Tatungsbericht Proceedings*, 681-686, Karlsruhe, Germany.

Doğan, N. ve Tuğrul, A. B., (2000). Radyasyon Dozu Tayini İçin Camların Stratejik Amaçlı Kullanımı, *T.C. Kara Kuvvetleri*

- Komutanlığı, NBC Okulu ve Eğitim Merkezi Komutanlığı, NBC Savunma Sempozyumu – III, 61-66, Küçükyalı, İstanbul.
- Doğan, N. ve Tuğrul, A. B., (2001/a). Dosimetric Evaluation of Gamma Doses by Using Irradiated Lead-Alkali-Silicate Glass, *Radiation Measurements*, **33**, 2, 211-216.
- Doğan, N. ve Tuğrul, A. B., (2001/b). Optical and Solar Parameters of Irradiated Lead-Alkali-Silicate Glass, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, **69**, 3, 241-250.
- Doğan, N. ve Tuğrul, A. B., (2001/c). Medikal Ürünlerin Radyosterilizasyonunda Kurşun-Alkali-Silika Camların Dozimetrik Amaçlı Kullanımı, 8. Ulusal Medikal Fizik Konferansı, İstanbul.
- Doremus, R. H., (1994). *Glass Science*, 313 sh., Second Edition, John Willey & Sons Inc.
- EN 410, (1998). *Glass in building-Determination of luminous and solar characteristics of glazing*, European Standart, Brusells.
- Ezz-Eldin, F. M., Abdel-Rahim, F., Shafı, N. A. ve El-Batal, H.A., (1988). Formation and decay of colour centres induced by gamma rays in alkali-borate glasses containing iron, *Physics and Chemistry of Glasses*, **29**, 6, 235-239.
- Ezz-Eldin, F. M., Abdel-Azim, F., Abdel-Azim, A. A. ve Ahmed, A. A., (1994/b). Soda-lime-silica glass for radiation dosimetry, *Medical Physics*, **21**, 7, 1085-1089.
- Lell, E., (1960). Synthesized impurity centres in fused silica, *Journal of American Ceramic Society*, **43**, 8, 422-426.
- Lide, D. R., (1995). *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 12-184pp, 76th Ed., CRC Press, New York.
- McCluney, R., (1994). *Introduction to Radiometry and Photometry*, 333-376, Artech House, Inc., USA.
- McLaughlin, W. L., (1989). *Dosimetry for Radiation Processing*, 34 pp, Taylor & Francis Inc., London.
- Sharaf, N. A., Ezz-Eldin, F. M. ve Ahmed, A. A., (1994). Effect of gamma-rays on the formation of colour centres in copper-containing lead borate glasses, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, **183**, 2, 205-216.
- Tooley, F. V., (1960/a). *Handbook of Glass Manufacture*, 31 pp, I, Ogden Publishing Company, New York 36, USA.
- Tooley, F. V., (1960/b). *Handbook of Glass Manufacture*, 18-20 pp, Volume II, Ogden Publishing Company, New York 36, USA.
- TSE, Türk Standartları, (1993). *TS 11172*, Camların ışık geçirgenliği, direkt güneş ışını geçirgenliği, toplam güneş enerjisi geçirgenliği, ultraviyole ışını geçirgenliği ve bunlarla ilişkili cam faktörlerinin tayini.
- Uhlmann, D. ve Kreidl, N. J., (1991). *Optical Properties of Glass*, 4-305, Published by The American Ceramic Society, Inc. Westerville, OH.
- Vogel, W., (1994). *Glass Chemistry*, 12 pp, Springer-Verlag, 2nd Press, Germany.