

Mersin Kuvars Kumunun X-Işınları ile Termoluminesans Özelliklerinin Çalışılması

İlbilge Özsu¹, Kasım Kurt^{2,*}

¹Ege Üniversitesi, Beden Eğitimi ve Spor Yüksekokulu, 35040, Bornova, İzmir, Türkiye

²Mersin Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, 33343, Mersin, Türkiye

*Yazışılan yazar e-posta: kasimkurt@gmail.com

Alınış: 22 Mayıs 2014, Kabul: 11 Ağustos 2014

Özet: Mersin Yeşilovacık Kuvars yataklarından alınan kuvars kumu örneklerinin Termoluminesansı (TL), oda sıcaklığından 400°C'ye kadar X-ışınları ile ışılandıktan sonra çalışılmıştır. Termoluminesans tuzak parametreleri Çeşitli Isıtma Hızı Oranı Yöntemi ile hesaplanmıştır. Isıtma hızları 0.5°C/s, 1°C/s, 2°C/s, 5°C/s ve 10°C/s olarak seçilmiştir. TL eğrilerindeki 90°C, 210°C ve 320°C maksimum sıcaklıklarına karşılık gelen tepe değerlerindeki kaymalar farklı ısıtma hızlarına göre tespit edilmiştir. Tepe sıcaklıklarındaki kaymalardan farklı ısıtma yöntemi ile tuzak parametreleri; aktivasyon enerjisi (E), frekans faktörü (s) hesaplanmıştır. Hesaplanan aktivasyon enerjileri ve frekans faktörü sırasıyla 0.84eV, $2.84 \times 10^{10} \text{ s}^{-1}$, 1.13eV, $2.34 \times 10^{13} \text{ s}^{-1}$ ve 1.78eV, $1.59 \times 10^{18} \text{ s}^{-1}$ olarak bulunmuştur.

Anahtar kelimeler: Kuvars, termoluminesans, tuzak parametreleri

Studies of Thermoluminescence Properties of Mersin's Quartz Sand with X-ray Irradiation

Abstract: The quartz samples collected from quartz sand deposits from Yeşilovacık Mersin region were studied Thermoluminescence (TL) from room temperature to 400°C after irradiated by X-ray source. Thermoluminescence trap parameters were calculated via Various Heating Rate (VHR) method. Heating rates were selected as 0.5°C/s, 1°C/s, 2°C/s, 5°C/s, 10°C/s. The peak maximum temperature shift values from TL glow curve at 90°C, 210°C and 320°C were monitored by VHR method. The temperature shift along to heating rates were used to calculate the trap parameters as Activation Energy (E) and Frequency Factor (s). The activation and frequency factor values were obtained as 0.84eV, $2.84 \times 10^{10} \text{ s}^{-1}$, 1.13eV, $2.34 \times 10^{13} \text{ s}^{-1}$ and 1.78eV, $1.59 \times 10^{18} \text{ s}^{-1}$ at selected peaks.

Key words: Quartz, thermoluminescence, trap parameters

1. Giriş

Kuvars dünya genelinde en yaygın mineral yataklarına sahip, bileşiği SiO₂, sertliği 7, özgül ağırlığı 2.85gr/cm³, erime sıcaklığı da 1785°C olan silika minerallerindedir. Doğada saydam veya mat, renksiz veya çeşitli renklerde bulunmaktadır [1]. SiO₂ mineral ve kayaları; birincil ve ikincil magmatik, hidrotermal veya sedimanter süreçler veya diyajenetik ve metamorfik süreçler sonucunda oluşmuştur [2]. Kuvars kumu ile yapılan ilk termoluminesans çalışmalarında x-ışınlarına maruz bırakıldıktan sonra lineer olarak ısıtılan kuvarsların luminesans yaptıkları ve soğurma merkezlerinin solduğu gözlenmiştir [3]. Daniels kuvarsların radyasyona duyarlı olmasını ve luminesans sinyallerini uzun süre korumasını, bir avantaj olarak tarihlendirme çalışmalarında kullanılmıştır [4]. Daha sonraki çalışmalarda arkeolojik buluntularından ayrıştırılan kuvars mineralleri ile tarihlendirme [5-8] yapıldığı görülmektedir.

Kuvars mineralinin termoluminesans pikleri ve yayılım spektrumunu birçok yazar tarafından çalışılmış ve yayınlanmıştır [9-12]. Kuvarsların TL eğrilerinde 85°C den 375°C kadar 0.85eV ile 1.66 eV arasında tuzak derinliğine sahip ve 0.13×10^{-3} ile 10^8 yıl yaşam

ömrü olan yaklaşık 8 pik kaydedilmiştir [7]. 325°C maksimum sıcaklığa sahip TL pikinin 1.66eV tuzak derinliğine sahip olduğu Wintle tarafından bildirilmiştir [13]. Kuarzların yapılan katodoluminesans(CL) çalışmalarında 360-440 nm (UV-Mavi), 460-500 nm (Mavi-Yeşil) ve 600-650 nm (Turuncu - Kırmızı) olmak üzere üç ana yayılım bandına sahip olduğu Demars tarafından gösterilmiştir [14]. Optiksel uyarılma ile lüminesans çalışmaları 647nm uyarılma kaynağı altında yayılım bandı 365nm civarında olup TL ışınım eğrisinde 325°C pik ile ilişkilendirilmektedir [15,16].

Günümüzde kuvarsın lüminesans özellikleri üzerine çok sayıda çalışma yapılmaktadır. Ancak literatürden görüleceği üzere kuvarsın özellikleri incelenirken içerisinde bulunan safsızlıklardan dolayı elde edilen ışıltama eğrilerinde ve dalga boyu şiddeti arasında çizilen grafiklerde, spektrumlarda bazı farklılıklar görülmektedir. Bu nedenle her bölgeden elde edilen kuvars minerallerinin farklı özelliklere sahip olduklarını söyleyebiliriz. Türkiye ve İspanya'dan alınan kuvarlar üzerine yapılan çalışmada, TL özelliklerinde farklılıklar olduğu gösterilmiştir [17]. Bu anlamda Mersin'in Yeşilovacık Bölgesinden alınan kuvars örnekleri ile lüminesans çalışmasının Türkiye'de ilk kez yapıldığını ve bu çalışmada elde edilen ilk sonuçların bundan sonra yapılacak çalışmalarda araştırmacılara ışık tutması beklenilmektedir. Bu çalışmada kuvars kumu olarak zengin yataklara sahip Mersin bölgesinden alınan kuvars örnekleri, önce kimyasal işlemlerden geçirilerek organik ve inorganik kirliliklerden ayrıştırıldıktan sonra termoluminesans özellikleri ve tuzak parametreleri çalışılmıştır.

2. Materyal ve Metod

Örnekler Mersin Yeşilovacık bölgesindeki kuvars maden yataklarından alınmıştır. Alınan örneklerin saflaştırma işlemi kaba tanecik kuvars hazırlama yöntemi ile yapılmıştır. Ağata havanda yavaş hareketlerle ezildikten sonra örnekler 140µ ile 250µ'luk eleklerden geçirilmiştir. İçerisindeki metal ve karbon bileşenlerini uzaklaştırmak için %10'luk HCl asit çözeltisinde 12 saat bırakılmış daha sonra nötürleştirilmek için saf su ile yıkanmıştır. Üzerindeki nemi almak için 80°C etüvde 1 saat bekletilerek iyice kurumayı sağlanmıştır. İçerisindeki Florit bileşiklerini uzaklaştırmak için %40'luk HF asit çözeltisinde 40dk bekletildikten sonra saf su ile yıkanıp tekrar HF çözeltisinde 5dk bekletilmiştir. Daha sonra 140µ'luk elek ile ıslak eleme yöntemi ile elenmiştir. Eleğin üzerinde kalan kuvars kaba tanecikleri çalışmada kullanılmak üzere alınmıştır. Bir sonraki aşamada ağır metal iyonlarının uzaklaştırılması için SodyumPoly-Tungustan ($Na_2W_2O_7$) çözeltisinde bekletilerek ağır metallerin çökmesi sağlanmıştır. Daha sonra 80°C etüvde 1 saat bekletildikten sonra kuvars örnekleri TL ölçümlerine hazır hale gelmiştir.

TL ölçümleri Celal Bayar Üniversitesi Fizik bölümünde bulunan RA' 94 TLD Reader-Analyser' ile yapılmıştır. RA94 TLD Reader-Analyser' maksimum ısıtma sıcaklığı 400°C olup lineer ısıtma hızı bir saniyede 0,5°C ile 20°C arasında ayarlanabilir özelliktedir. TL ölçümlerinde ısıtma hızı 0,5 °C/s, 1 °C/s, 2 °C/s, 5 °C/s, ve 10°C/s olarak alınmıştır. Tuzak parametrelerinin hesaplanmasında "çeşitli ısıtma hızı oranı yöntemi" uygulanmıştır.

2.1. Çeşitli Isıtma Hızı Oranı Yöntemi

Termoluminesans tuzak parametrelerini hesaplanmanın bir yöntemi olan Çeşitli Isıtma Hızı Oranı Yönteminde örneklerin TL ölçümlerinde farklı ısıtma hızları (β) kullanılır. Isıtma hızlarına göre TL tepe sıcaklıklarında kaymalar olduğu görülür. İki farklı ısıtma hızı

kullanılarak Aktivasyon Enerjisi hesabı için Bohum'un [18] uyguladığı yöntemde birinci dereceden tuzaklar için

$$\frac{\beta E}{kT_M^2} = se^{-(E/kT)} \quad (1)$$

denklem (1) kullanılarak

$$E = k \frac{T_{M1}T_{M2}}{T_{M1}-T_{M2}} \ln \left[\frac{\beta_1}{\beta_2} \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^2 \right] \quad (2)$$

denklem (2) elde edilir. Aktivasyon hesabı denklem (2) kullanılarak hesaplanır.

Hoogenstraaten [19] yaptığı çalışmada, birden fazla ısıtma hızı kullanılarak birinci dereceden durumlar için denklem (3) elde edilir.

$$\ln \left(\frac{T_M^2}{\beta} \right) = \frac{E}{kT_M} + \ln \left(\frac{E}{sk} \right) \quad (3)$$

Denklem 3 kullanılarak $\ln(T_M^2/\beta_M)$ 'e karşılık $1/T_M$ grafiği çizilir. Elde edilen doğrunun eğimi aktivasyon enerjisi E 'yi verir. Elde edilen doğru $1/T_M$ eksenini $\ln \left(\frac{E}{sk} \right)$ 'da keser; buradan da frekans faktörü hesaplanabilir. Bu metodunun uygulanmasında ısıtıcı ile örnek arasındaki ısısal temasın çok iyi olması gerekir. Aksi takdirde ısısal temastan kaynaklanan sıcaklık gecikmeleri TL piklerine yansıyan istenmeyen durumlar oluşturur.

3. Bulgular

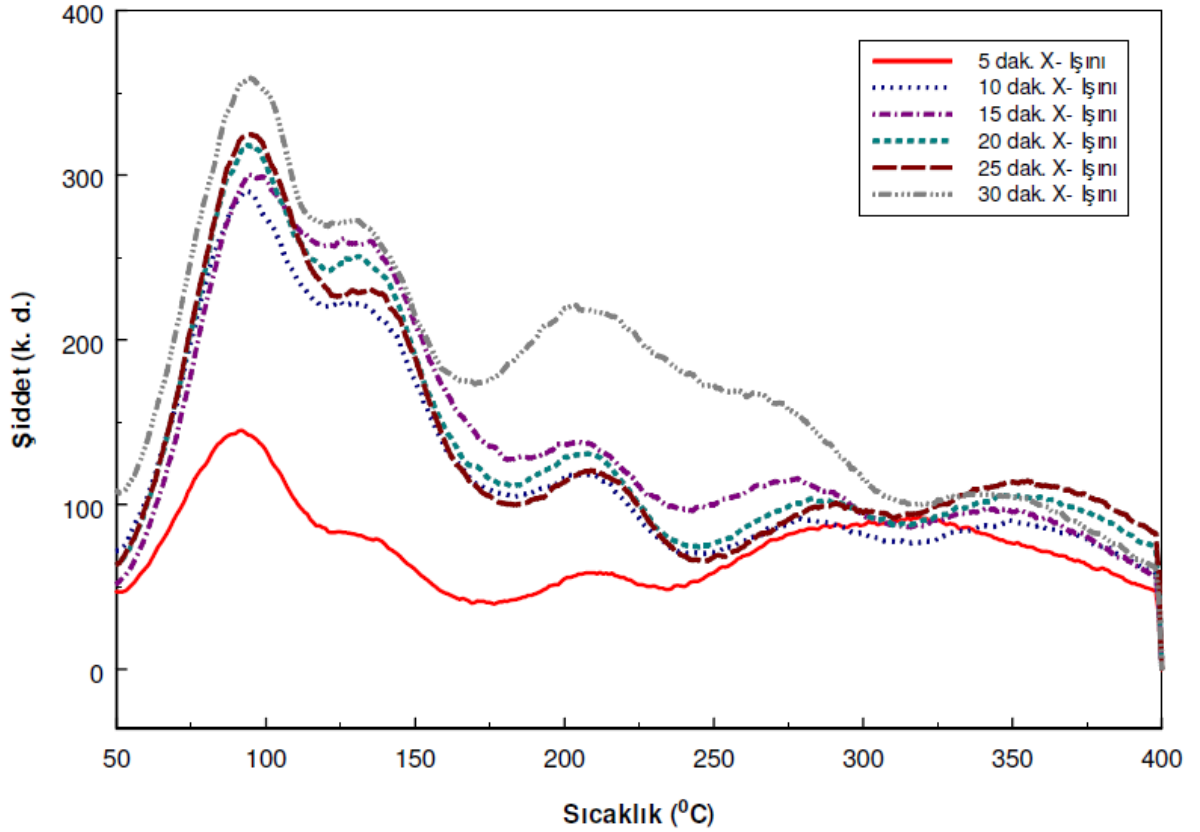
Kuvars kumu örneklerine uygulanan saflaştırma işleminden sonra tanecik boyutu 140-250 µm büyüklüğünde ayrıştırılan örnekler, saflıklarını belirlemek amacıyla ile XRF(X-Işın Floresans) ölçümleri yapılmıştır. Ölçüm sonuçları Tablo 1'de verilmektedir. Tablodan görüldüğü gibi kimyasal ayrıştırma işleminden sonra saflık oranı %98 civarındadır. XRF ölçümlerinden sonra örneğimizin optiksel soğurma ve TL analizleri yapılmıştır.

Tablo 1. Kuvars Kumunun XRF ölçümlerine göre madde analiz tablosu

Elemental Analiz Öncesi		Elemental Analiz Sonrası	
Element	%Oksit	Element	%Oksit
Al= 3,71	Al2O3= 5,802	Al= 0,080	Al ₂ O ₃ = 0,151
Ca= 1,468	CaO= 2,054	Ca= 0,320	CaO= 0,447
Cl= 0,092	Cl= 0,092	Cl= 0,050	Cl= 0,050
Cr= 0,006	Cr2O3= 0,009	Cr= 0,006	Cr2O3= 0,008
Fe= 0,150	Fe2O3= 0,214	Fe= 0,043	Fe2O3= 0,062
K= 1,162	K2O= 1,400	K= 0,025	K2O= 0,030
Mg= 0,935	MgO= 1,550	Mg= 0,225	MgO= 0,373
Mn= 0,005	MnO2= 0,008	Na= 0,026	Na2O= 0,035
Zn= 0,003	ZnO= 0,003	Ni= 0,001	NiO= 0, 002
O= 51,548		O= 53,025	

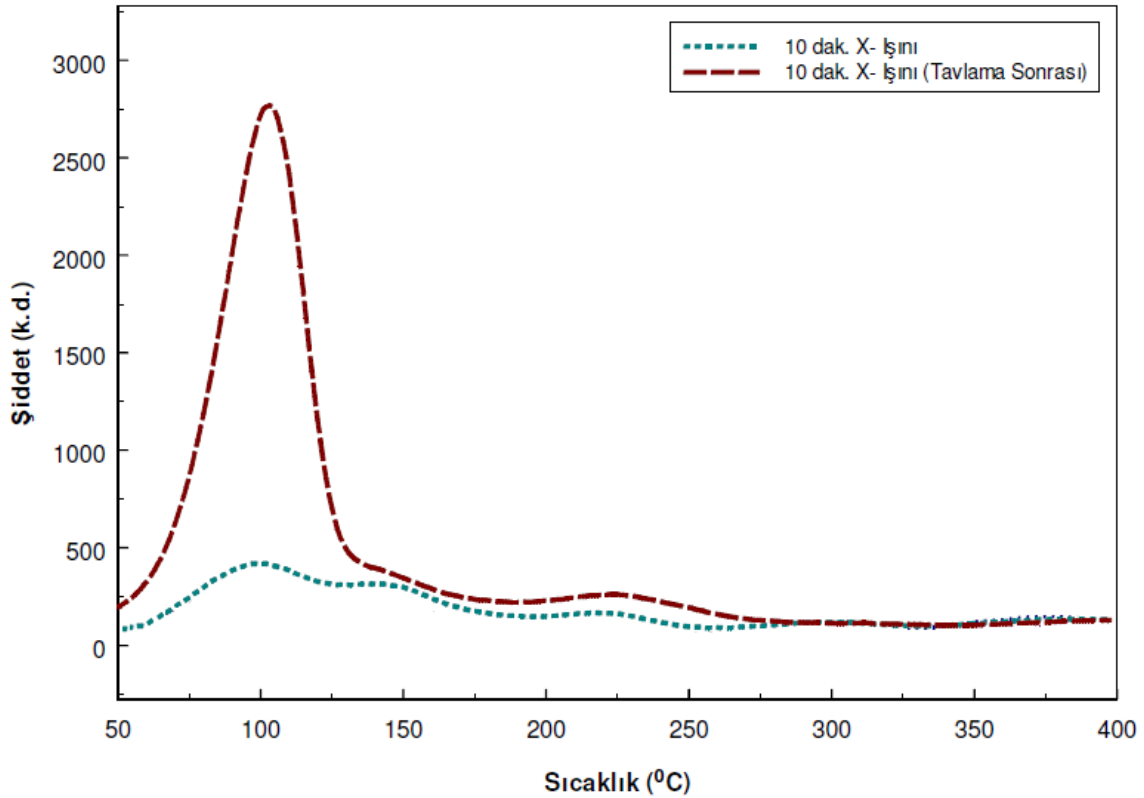
P= 0,141	P2O5= 0,323	P= 0,166	P2O5= 0,379
S= 0,030	SO3=0,075	S= 0,022	SO3=0,055
Si= 41,240	SiO2= 88,227	Si= 45,96	SiO2= 98,3
Sr= 0,002	SrO= 0,002	Sr= 0,001	SrO= 0,001
Ti= 0,131	TiO2= 0,218	Ti= 0,030	TiO2= 0,050
Zr= 0,014	ZrO2= 0,020	Zr= 0,016	ZrO2= 0,022
Rb= 0,001		Rb= 0,001	

Kuvars örnekleri TL ölçümleri yapılmadan önce X-ışınlarına maruz bırakılmıştır. Örneklere radyasyon verdikten sonra sığ tuzakların lüminesansı etkilememesi için kısa bir süre karanlık ortamda bekletilmiştir. X-ışınları ışınlama süreleri sırasıyla 5dk, 10 dk, 15dk, 20dk, 25dk ve 30dk dir. Düşük doz olarak nitelendirilen 5dk ışınlamadan sonra alınan TL eğrisinde 90°C, 130°C, 210°C, 290°C ve 320°C’de pikler görülmektedir. Radyasyon şiddeti arttıkça lüminesans şiddetinde de belirgin artış gözlenmektedir. Kuvars örneklerinin dozimetrik özellik gösterebilmesi için doz cevap eğrisinde lineerlik göstermesi beklenir. Ayrıca radyasyona tutulma süresi arttıkça bazı piklerin maksimum sıcaklıklarında değişiklik olmazken bazılarında sağa kaymalar görülmektedir. Radyasyon şiddeti arttıkça TL piklerinde kayma olmaması pikin birinci dereceden, diğer durumlarda ise derecenin birden farklı olduğunu gösterir [9]. Örneklerin tavlansızdan önce ölçülen TL eğrilerinin, iç içe girmiş piklerin süperpozisyonundan oluştuğu ve radyasyon ölçümünde kullanılabilir bir pikin olmadığı görülmektedir Şekil 1.



Şekil 1. Artan doza karşı TL şiddetinin sıcaklığa göre grafiği

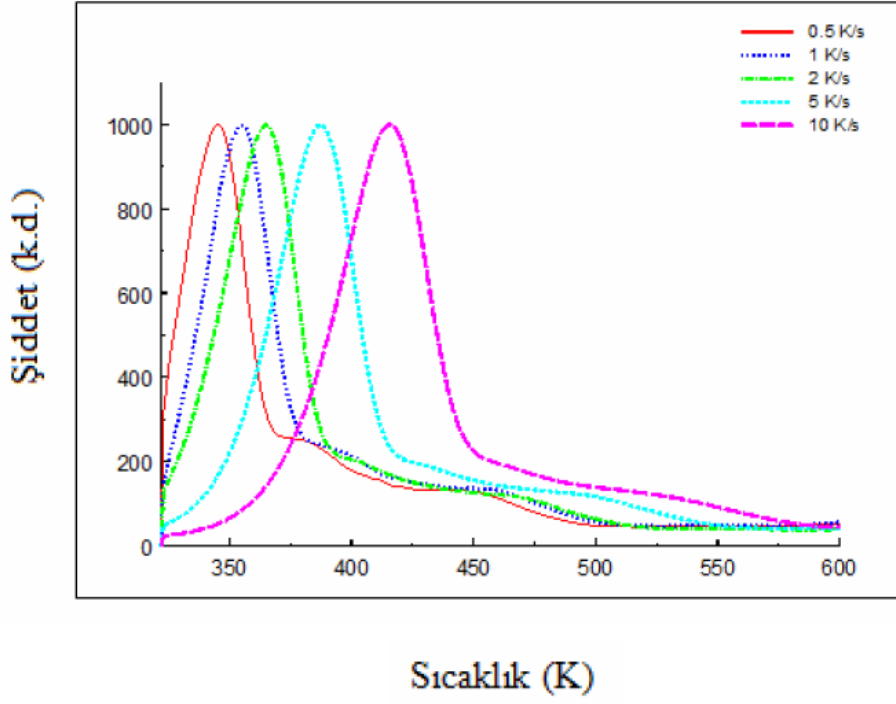
Kuvars örnekleri ısıl işlemlerden geçirildikten sonra tekrar TL sinyalleri ölçülmüştür Şekil 2. Isıl işlem olarak 500 °C 1 saat tavlama uygulanmıştır. Tavlamada örnekler oda sıcaklığında etüve konulduktan sonra 5°C/s ısıtma hızı ile 500 °C 'ye kadar ısıtılmış ve 1 saat süresince etüvde bekletilmiştir. Daha sonra etüv kapatılarak örnekler yavaş soğumaya bırakılmıştır. Bu süreçte grafikten de anlaşılacağı gibi ışınımsız geçişlere neden olan ara enerji seviyeleri, iyonların kristal yapı içerisinde yeniden organize olmasıyla pasif hale geçmiştir. Bu da lüminesans yoğunluğunun ~90 °C -100 °C civarındaki pik için 7 kat artışı diğer bölgelerde ortalama olarak %5 artışı Şekil 2.'den görülmektedir.



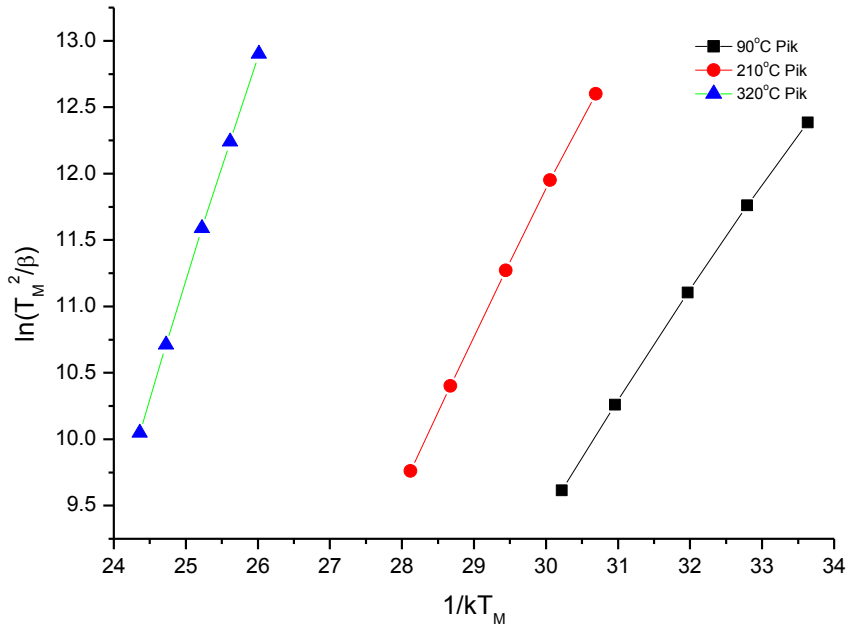
Şekil 2. Tavlandıktan önce ve tavlandıktan sonra aynı orandaki radyasyona tabi tutulan örneğin TL eğrisi

Tuzak parametrelerini hesaplamak için farklı ısıtma hızı oranı yöntemi uygulanmıştır. Isıtma hızları sırasıyla 0.5°C/s, 1 °C/s, 2 °C/s, 5 °C/s ve 10 °C/s kullanılarak TL eğrileri elde edilmiştir. Farklı ısıtma oranı yöntemine göre yapılan ölçümlerin TL eğrileri birinci pike göre normalize edilmiştir. Şekil 3'ten de görüldüğü gibi 5 °C/s ısıtma hızı ile alınan ölçümlerde birinci pik 110°C konumlanmış kuvarsın TL piki ile uygunluk göstermektedir. Hesaplamalarda sıcaklık Kelvin cinsinden alınacağı için Şekil 3'deki grafiğin sıcaklık eksenini Kelvin cinsinden seçilmiştir. Şekil 3'deki grafikte ısıtma hızı arttıkça piklerin sağa kayması TL teorisi ile uyumlu olduğunu gösterir [9]. Alınan TL ölçümlerinden takip edilebilen her bir pik için $\ln(T_M^2/\beta_M)$ 'e karşılık $1/T_M$ grafiği çizilmiş ve elde edilen doğrular için Kitis doğrulama işlemi uygulanmıştır [20]. Her üç pik için yapılan doğrulama işlemi sonucunda Şekil 4 'deki grafikler elde edilmiştir. Grafikten elde edilen doğrular, denklem 2 dikkate alınarak eğimleri hesaplanmış ve Aktivasyon Enerjisi E bulunmuştur.

Frekans faktörü, denklem 2'de her bir doğru için yatay eksenini kesen noktalar belirlenerek $\ln\left(\frac{E}{sk}\right)$ ifadesinden hesaplanmıştır. Hesaplanan tuzak parametreleri Tablo 2'de verilmektedir.



Şekil 3. Farklı ısıtma hızlarına göre kuvars örneklerinin TL eğrileri



Şekil 4. Çeşitli ısıtma hızı oranı yöntemi kullanılarak $\ln(T_M^2/\beta_M)$ 'e $1/T_M$ karşı grafiği

Tablo 2. Kuvars kumunun Termoluminesans parametreleri

<i>Pik</i>	<i>T (°C)</i>	<i>E (eV)</i>	<i>s(s⁻¹)</i>
P1	90	0.84±0.04	2.84x10 ¹⁰
P2	210	1.13±0.03	2.34x10 ¹³
P3	320	1.75±0.07	1.59x10 ¹⁸

4. Tartışma ve Sonuç

Mersin Yeşilovacık kuvars yataklarından alınan örnekler, kimyasal saflaştırma işlemlerinden sonra, XRF sonuçlarından %98 oranında SiO₂ bileşiminden oluştuğu görülmüştür. X-ışınları ile radyasyona tutulduktan sonra Termoluminesans eğrilerinin artan doza karşı ışımaya şiddetlerinde de artış olduğu gözlenmiştir. Kuvarsların 500°C üzerinde faz değiştirdiği bilinmektedir. Örneklerin faz değişikliğinden etkilenmemesi için tavlama sıcaklığı 500°C olarak seçilmiştir. Örnekler 500°C derecede tavlandıktan sonra termoluminesans eğrisinde P1 piki baskın hale gelmiştir ve luminesans şiddeti 7 kat artmıştır. TL eğrisindeki diğer bölgelerde luminesans şiddetindeki artış %5 civarındadır. Belirgin piklerin çeşitli ısıtma hızı yöntemi ile tuzak parametreleri, ancak üç pik üzerindeki kaymalar belirlenerek hesaplamalar yapılmıştır. P1, P2 ve P3 piklerinin aktivasyon enerjileri sırasıyla 0.84±0.04eV, 1.13±0.03 ve 1.75±0.07 olarak hesaplanmıştır. Her bir pike ait frekans faktörü ise 2.84x10¹⁰, 2.34x10¹³ ve 1.59x10¹⁸ dir.

Pagonis farklı bölgelere ait kuvarslar üzerine yaptığı çalışmada TL eğrisinde 13 pik tespit etmiş ve bilgisayarlı ayırıştırma medodu yardımı ile piklere ait tuzak parametrelerini 0.85eV ile 1.40eV arasında hesaplanmıştır [21]. Yazıcı ve Topaksu doğal kuvarslar ile yaptıkları çalışmada TL eğrisinin 7 pikten oluştuğunu tespit etmişlerdir [22]. Bu piklerin tuzak parametreleri üç farklı yöntemle hesaplanmıştır. Piklerin aktivasyon enerjilerini 0.90 ile 2.33eV arasında değişen değerlerde bulmuşlardır. Petrov ve Bailiff kuvarslar ile yaptıkları çalışmada 0.71eV ile 1.27eV arasında değişen 5 farklı pik hesaplamışlardır [23]. Farklı bölgelere ait doğal kuvarsların TL eğrilerini oluşturan elektron tuzaklarının parametrelerinde farklılık görülmesine rağmen, 90°C-130°C sıcaklıkları arasında kalan bölgelerdeki pikler için tuzak parametreleri birbirine yakın değerlerdedir.

Bu çalışmada hesaplanan P1, P2 ve P3 karşılık gelen aktivasyon enerjileri 0.84eV, 1.2eV ve 1.33eV olarak hesaplanmıştır. Bu değerler P1 ve P2 piklerinin aktivasyon enerjileri literatürde hesaplanan değerler ile uyumluluk gösterirken P3 pikinde uyumsuzluk vardır. Hesaplanan tuzak parametreleri TL eğrisinin altında kalan tüm pikleri kapsamamaktadır. Çeşitli ısıtma hızı oranı yöntemi ile tuzak parametrelerinin hesabının yapılabilmesi için piklerin maksimum tepe sıcaklıklarının sıcaklık artış hızına göre takip edilebilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır. TL eğrisinin altında kalan diğer piklerin tuzak parametrelerinin hesaplanabilmesi için T_m-T_{stop} yöntemi uygulanarak TL tepeleri belirlenebilir ve buna uygun olarak eğri bilgisayar ayırıştırma metodu ile yeniden oluşturularak tuzak parametrelerinin hesaplanması önerilebilir.

Teşekkür

Bu çalışmada TL ölçümleri Celal Bayar Üniversitesi Fizik Bölümü Araştırma laboratuvarlarında yapılmıştır. Katkılarından dolayı teşekkür ederiz.

Kaynaklar

- [1] Demange M., 2012. Mineralogy for Petrologists, Taylor & Francis Group, LLC.
- [2] Heany P.J, Prewitt C.T, Gibbs, G.V., 1994. Silica-physical behaviour, geochemistry and materials application, *Reviews in Mineralogy*, vol 29. Mineralogical Society of America, Washington, p 606
- [3] Yokota, R., 1953. Thermoluminescence of Quartz and Fused Quartz Colored by X-Ray Irradiation, *Physical Reviews*, 91: 1013.
- [4] Daniels F., Boyd C.A., Saunders D.F., 1953. Thermoluminescence as a research Tool, *Science*, 117: 343-349.
- [5] Fleming S.J., 1970. Thermoluminescence dating refinement of quartz inclusion method, *Archaeometry*, 12: 135-145.
- [6] Huntley D.J., Short M.A., Dunphy K., 1996. Deep traps in quartz and their use for optical dating, *Canadian Journal of Physics*, 74: 81-91.
- [7] Aitken M.J., 1985. Thermoluminescence Dating, Academic Press, London, p 359.
- [8] Göksu H.Y., Fremlin J. H., 1972. Thermoluminescence from unirradiated flints: regeneration thermoluminescence, *Archaeometry*, 14(1): 127-132.
- [9] McKeever, S. W. S., 1985. Thermoluminescence of Solids, Cambridge University Press, Cambridge, UK., p.376.
- [10] Krbetschek M.R., Goetze J., Dietrich A., Trautmann T., 1997. Spectral information from minerals relevant for luminescence dating, *Radiation Measurements*, 27(5-6): 695-748.
- [11] Bøtter-Jensen L., Andersen C. E., Duller G.A.T., Murray A.S., 2003a. Developments in radiation, stimulation and observation facilities in luminescence measurements, *Radiation Measurements*, 37: 535-541.
- [12] Gartia R. K., Singh L.L., 2011. Evaluation of trapping parameter of quartz by deconvolution of the glow curves, *Radiation Measurements*, 46: 664-668.
- [13] Wintle V., 1975. Thermal quenching of thermoluminescence in Quartz, *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 41: 107-113.
- [14] Demars, C., Pagel M., Deloule E., Blanc P., 1996. Cathodoluminescence of Quartz From Sandstones: Interpretation of The Uv Range by Determination of Trace Element Distributions and Fluid-Inclusion P-T-X Properties in Authigenic Quartz, *American Mineralogist*, 81: 891-901.
- [15] Huntley D. J., Godfrey-Smith, D. I., Haskell, E. H., 1991. Light-induced emission spectra from some quartz and feldspars, *International Journal of Radiation Applications and Instrumentation*, 18: 127-131.
- [16] Smith B. W., Rhodes E. J., Stokes S., Spooner N.A., 1990. The optical dating of sediments using quartz, *Radiation Protection Dosimetry*, 34: 75-78.
- [17] Topaksu M., Dogan T., Yüksel M., Kurt K., Topak Y., Yegingil Z., 2014. Comparative study of the thermoluminescence properties of natural metamorphic quartz belonging to Turkey and Spain, *Radiation Physics and Chemistry*, 96: 223-228.
- [18] Bohum A., 1954. Emission aus nichtmetallischen kristallen, *Czechoslovak Journal of Physics*, 4:91-99.
- [19] Hoogenstraaten W., 1958. Electron traps in zinc-sulphide phosphors, *Philips Research Reports*, 13: 515- 693.
- [20] Kitis G., Tuyn J. W. N., 1999. Correction for temperature lag and thermal gradient effects arising during thermoluminescence readout, *Radiation Protection Dosimetry*, 84(1-4): 371-374.
- [21] Pagonis V., Tatsis E., Kitis G., Drupieski C., 2002. Search for common characteristics in the glow curves of quartz of various origins, *Radiation Protection Dosimetry*, 100(1-4): 373-376.
- [22] Yazici A. N., Topaksu M. 2003. The analysis of thermoluminescence glow peaks of unannealed synthetic quartz, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 36: 620-627.
- [23] Petrov S. A., Bailiff I. K., 1995. The 110°C TL Peak in synthetic quartz, *Radiation Measurements*, 24(4): 519-523.