



Araştırma Makalesi / Research Article

Deprem Araştırmalarında Optik Uyarmalı Lüminesans Tarihlendirme: Kuvars Minerallerinde SAR Protokolü Uygulamaları

Optically Stimulated Luminescence Dating in Earthquake Research: Applications of the SAR Protocol in Quartz Minerals

Mehmet YÜKSEL 

Çukurova Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü Sarıçam, Adana, Türkiye

Geliş (Received): 11 Mayıs (May) 2024 / Düzeltme (Revised): 23 Mayıs (May) 2024 / Kabul (Accepted): 26 Mayıs (May) 2024

ÖZ

Optik uyarmalı lüminesans (OSL) tarihlendirme, paleosismoloji çalışmalarında fay segmentlerinden alınan örneklerin yaşlarını 1 milyon yıla kadar geniş bir aralıkta hesaplamak için kullanılan en önemli yöntemlerden biridir. Temel olarak OSL yöntemi ile örneklerin gün ışığını en son gördükleri zaman hesaplanabilmektedir. Toprakta bol miktarda bulunan kuvars, feldspat vb. minerallerin gömülü oldukları süre boyunca biriktirdikleri doğal radyasyon enerjisi OSL tarihlendirme yönteminin veri kaynağını oluşturmaktadır. Bu çalışmada, hendeklerin açılması, OSL örneklerinin alınması ve yaş hesaplamalarının yapılması süreçleri ile ilgili genel bilgiler ve dikkat edilmesi gereken önemli noktalara vurgu yapılmış ve daha sonra deneysel çalışmalara yer verilmiştir. Deneysel çalışmalarla laboratuvar ortamında yaşlandırılan (M1: 940 ± 65.8 yıl, M2: 6230 ± 323.96 yıl, M3: 24000 ± 715 yıl) kuvars örneklerinin tek tablet doz yenileme (SAR) protokolü ile eşdeğer dozları belirlenerek OSL yaşları hesaplanmış ve yaşa karışan hataların hesaplanması ile ilgili istatistiksel değerlendirmeler yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Deprem, OSL Tarihlendirme, Paleosismoloji, SAR Protokolü, Yaş istatistiği

ABSTRACT

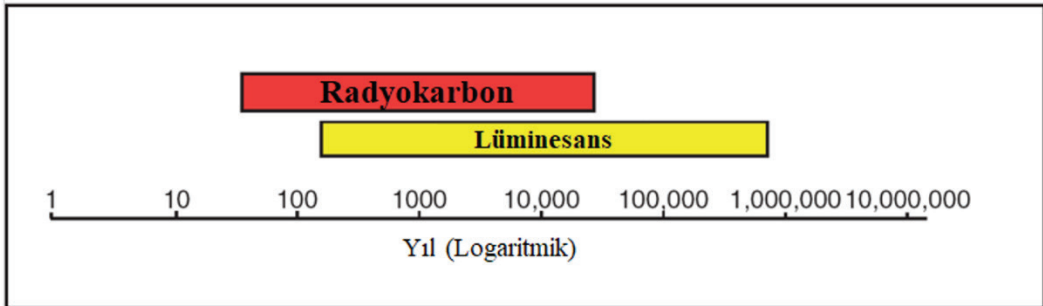
Optically stimulated luminescence (OSL) dating is one of the most important methods in paleoseismology studies to calculate the ages of samples taken from fault segments over a wide range of up to 1 million years. Basically, the time when the samples last saw daylight can be calculated with the OSL method. The natural radiation energy that minerals such as quartz, feldspar, etc., which are abundant in the soil, accumulate during their burial is the data source of the OSL dating method. In this study, general information and important points to be considered about the processes of opening trenches, taking OSL samples and making age calculations are emphasized; and then experimental studies are included. OSL ages were calculated by determining the equivalent doses of quartz samples aged in the laboratory (M1: 940 ± 65.8 years, M2: 6230 ± 323.96 years, M3: 24000 ± 715 years) using the single aliquot regeneration (SAR) protocol, and statistical evaluations were made for the calculation of age errors.

Keywords: Earthquake, OSL Dating, Paleoseismology, SAR Protocol, Age statistics

GİRİŞ

Yalıtkan ve yarıiletken fosforlar doğal ya da yapay radyasyon kaynaklarından yayılan iyonlaştırıcı radyasyona maruz kaldıklarında radyasyon kaynaklı enerjinin bir kısmını soğururlar. Fosforun yapısında depolanan bu enerji, fosforun bir dış kaynakla (ısı, ışık, elektrik alan, basınç vb.) uyarılması sonucunda serbest kalarak ışık olarak yayınlanır. Meydana gelen bu ışık yayınlanması olayı lüminesans olarak adlandırılmaktadır (Gribkovskii ve Vij, 1998; Feathers, 2008; Yukihara ve McKeever, 2011; Yüksel, 2018). Fosforun enerji soğurmasını takiben dış uyarım kaynağı olarak ışık -örneğin mavi- kullanılması sonucunda depolanan enerjinin yine görünür ışık olarak yayılması olayına optik uyarımlı lüminesans (optically stimulated luminescence, OSL) adı verilmektedir (Aitken, 1998). OSL mekanizması, tarihsel gelişim sürecinde dozimetrik çalışmalarda maruz kalınan iyonlaştırıcı radyasyon dozunun ve katıların bazı lüminesans parametrelerinin hesaplanması çalışmalarında kullanıldığı gibi arkeolojik ve jeolojik materyallerin yaşlarının tespit edilmesinde de çokça başvurulan yöntemlerden biri olmuştur (Aitken, 1997). Sedimanların OSL yöntemi kullanılarak tarihlendirilmesi ile ilgili ilk çalışmalar Huntley vd., (1985) tarafından yapılmış olup OSL tarihlendirme yönteminin kullanımı ile ilgili

tarihsel süreç de böylece başlamıştır. Yapılan tarihlendirme çalışmalarında başta kuvars olmak üzere feldspat ve kalsit gibi minerallerin en son güneş ışığına maruz kalmasından bu yana geçen süreye ilişkin hesaplamalar yapılmaya başlanmış ve yöntem tarihsel süreci içerisinde daha da geliştirilerek günümüzdeki yerini almıştır (Huntley vd., 1993; Murray ve Wintle, 2000). OSL tarihlendirme yöntemi kullanılarak başlangıçta 350-400 bin yıla kadar tarihlendirme çalışmaları yapılabilirken teknolojinin gelişimi ile bilgisayarla eğri benzetimlerinin ileri düzeyde yapılabilmesi, özellikle deneysel imkanların gelişmesi ve deneysel veri destekli teorik çözümlenmelerle birlikte lüminesans tuzak ve yük yapılarının daha anlaşılır hale gelmesi sonucunda tarihlendirilebilir yaş aralığı ellili yıllardan 1 milyon yıla kadar (Jull, 2018) uzanan geniş bir yelpazede yapılmaya başlanmıştır (Şekil 1). Yapılan en titiz çalışmalarda OSL yaşlarının % 4-5, titiz davranılmayan çalışmalarda %5-10 seviyesinde hata içerdiği bilinmekle birlikte hata yüzdesi çok genç (ellili) veya çok yaşlı (milyon mertebesindeki) örneklerde artabilmektedir (Feathers, 2008; Wallinga vd., 2014). Yaşa karışabilecek bu hatalar aynı örnek grubundan mümkün olduğunca çok sayıda örnek hazırlanması ve elde edilen yaşların istatistiksel olarak değerlendirilmesi sonucunda kabul edilebilir bir seviyeye indirilebilmektedir.



Şekil 1. Radyokarbon ve lüminesans tarihlendirme yöntemleri için zaman ölçekleri.

Figure 1. Time scales for radiocarbon and luminescence dating methods.

İnsanlık tarihinden de eski olan deprem ve depremle yeryüzünün yeniden şekillenmesi gerçeği göz önüne alındığında yeterli bilimsel çalışmaların yapılmaması ve alınması gereken önlemlerin alınmaması durumunda can ve mal kayıpları yanında tarihsel ve kültürel kayıpların da yüksek oranda yaşanacağı bir gerçektir. Özellikle ülkemizde 6 Şubat 2023 tarihinde Kahramanmaraş iline bağlı Pazarcık ve Elbistan ilçelerinde meydana gelen moment büyüklükleri sırasıyla 7.7 ve 7.6 olan depremler ve bu depremlerden sonra meydana gelen sayısı binlerle ifade edilen artçı depremlerde yaşanan kayıplar deprem gerçeğini bir kez daha gözler önüne sermiştir. Bu nedenle yaşanmış depremlerin disiplinler arası çalışmalarla bilimsel olarak incelenmesi, risk azaltma çalışmalarının yapılması ve bu çalışmaların sürekli hale getirilmesi oldukça önemli ve güncelliğini koruyan bir çalışma alanıdır. Depremler bağlamında düşünüldüğünde tarihlendirme teknikleri, tarih boyunca meydana gelen depremlere ait izlerin incelenmesi ve araştırılması anlamına gelen Paleosismoloji çalışmalarının olmazsa olmazlarından. Deprem araştırmalarında, yapılan paleosismolojik çalışmalarla fayların açılması, eski deprem izlerinin incelenmesi ve fayda meydana gelen olayların meydana gelme zamanlarına ait tarihlendirme çalışmalarının yapılması depremin geçmişini ve geleceğini anlayabilmek adına oldukça önemlidir. Özellikle OSL ve radyokarbon (^{14}C) teknikleri paleosismoloji çalışmalarında en çok tercih edilen tarihlendirme yöntemlerinin başında gelmektedir. OSL tekniği ile milyon yıl mertebelerine, ^{14}C tekniği ile de elli bin yıla kadar olan depremlerle ilgili tarihlendirme yapılabilmektedir (Feathers, 2008; Wallinga vd., 2014). Bu nedenle daha geniş bir tarihlendirme aralığına sahip olan OSL tekniği günümüzde en çok tercih edilen tarihlendirme yöntemlerinden biri olmuştur. OSL tarihlendirme

yöntemi, paleosismoloji çalışmalarında fay ve fay çevresinde meydana gelen olaylarla ilgili çok önemli ve kullanışlı veriler sağlayan bir teknik konumundadır.

Deprem araştırmaları ile ilgili yakın tarihe ait bilimsel yayınlar incelendiğinde hem yurtdışı kaynaklı çalışmalarda hem de Türk araştırmacılar tarafından ülkemizde meydana gelen depremlere bağlı olarak faylar üzerinde yaptıkları çalışmalarda OSL tarihlendirme yönteminin tercih edildiği görülmektedir. Ran vd. (2010), Longmenshan fay zonunun Beichuan-Yingxiu Fayı ve Jiangyou-Guanxian Fayı'nın orta segmentindeki yüzey yırtılma zonları boyunca 3 sahada ayrı ayrı 3 hendek kazmışlar ve Leigu, Bailu ve Xiaoyudong hendeklerinden aldıkları örnekleri OSL tekniği ile tarihlendirmişlerdir. Yapılan tarihlendirme çalışmalarının sonucunda tüm hendeklerden alınan örneklerden en genç olanın yaşını 60 ± 10 yıl ve en yaşlı olanın yaşını ise 54900 ± 12500 yıl olarak hesaplamışlardır. Xiaobo vd., (2021), 2003 yılında 6.1 büyüklüğünde deprem meydana gelen Tibet Platosunun kuzeydoğu ucundaki Minle-Yongchang fay zonu üzerinde yaptıkları çalışmalarla fay üzerinde meydana gelen deprem dizilerini aydınlatmaya çalışmışlardır. Yaptıkları çalışmada OSL tarihlendirme tekniği ile fay düzlemlerindeki olay bölgelerinden aldıkları örnekleri tarihlendirerek yaşlarını belirlemişler ve sonuç olarak meydana gelen 2003 depreminin Hexi Koridor Havzasındaki kör bir ters fay ile ilişkili kıvrımın en son aktivitesinden kaynaklandığını bildirmişlerdir. Tsodoulos vd. (2016), "Gyrtoni Fayı'nın Orta-Geç Holosen Deprem Geçmişi, Orta Yunanistan: Optik Uyarmalı Lüminesans (OSL) Tarihleme ve Paleosismolojiden Elde Edilen Bilgiler" başlıklı çalışmalarında, Yunanistan'da bulunan Gyrtoni Fayı'nın Holosen sismotektonik davranışını anlamak ve geçmiş depremlerin zamanlamasını

tahmin etmek için paleosismolojik hendekler kazarak hem yukarı hem de aşağı atımlı fay bloklarından flüviyal-kolüvyal tortu örnekleri almışlardır. OSL tarihlendirme tekniğinde kullanılan tek tablet doz yenileme (SAR) protokolü ile aldıkları örneklerin yaşlarını belirlemişlerdir. Elde ettikleri yaşların tutarlı ve mevcut stratigrafik veriler, arkeolojik kanıtlar ve radyo karbon tarihleri ile uyumlu olduğunu rapor etmişlerdir. Atlıhan ve Meriç (2008), Türkiye’de Denizli ilinde bulunan bir ana fay hattından aldıkları örnekleri OSL tekniği tarihlendirme protokollerinden çok tablet ek doz (MAAD) ve SAR yöntemlerini kullanarak tarihlendirmişler ve örneklere ait yaşları 5490 ± 300 yıl ile 6000 ± 320 yıl arasında hesaplamışlardır. Softa vd. (2023), Batı Anadolu genişleme provensinin eğim atımlı aktif faylarından biri olan Manisa Fayı’nın Pleistosen’den Holosen’e kadar olan deprem döngüsünü araştırmak için fay yüzeyindeki OSL ağartma profillerinin depremler tarafından üretilen taze fay yarıklarının açığa çıkmasıyla doğrudan ilişkili olmasından hareketle OSL yüzey pozlama tekniklerini kullanmışlardır. Sonuç olarak önceki kozmojenik tarihlendirme ve hendek tabanlı paleosismolojik kronolojik verilerle uyumlu sonuçlar elde etmişler ve OSL yüzey kronolojisinin paleo-depremlerin fay yarıklarının tarihlendirilmesi için umut verici bir alternatif olduğunu bildirmişlerdir. Dogan vd. (2015), Doğu Anadolu Fay sisteminin Türkoğlu-Antakya segmentinde açtıkları hendeklerden aldıkları örneklerden alüvyon sediman örneklerinin birikim zamanını belirlemek için OSL tarihlendirme tekniği kullanmışlar ve aldıkları örneklerin yaşlarını belirleyerek henüz belgelenmemiş tarihsel deprem olaylarının OSL tekniği ile belirlenebileceğini bildirmişlerdir. Karabacak vd. (2013), Türkiye’nin Güneybatısında yer alan Kibyra Antik Kenti’nde meydana gelmiş olan tarihi depremlerle ilgili

yaptıkları çalışmada OSL yöntemini kullanarak yıkılan blokların altındaki çökellerden yaş hesaplamışlar ve elde ettikleri sonuçlara bağlı olarak M.S. 10-11. yüzyıl civarında meydana gelen ve Kibyra stadyumunda büyük hasara ($I_0 = VIII-IX$) neden olan başka bir büyük olayın varlığını bildirmişlerdir. Duran vd. (2021), Manisa Fay Zonu’nun doğu segmentinin Holosen sismotektonik davranışını ortaya çıkarabilmek için ilk kez hendek tabanlı paleosismolojik analizler yapmışlar ve yaptıkları çalışmada OSL ve radyokarbon tarihlendirme yöntemlerini kullanmışlardır. Elde ettikleri yaşlardan faydalanarak çalıştıkları segment üzerindeki en son yüzey kırıklı depremden bu yana yaklaşık 159 yıl geçmiş olduğunu bildirmişlerdir. Öncü vd. (2024), İzmir ilinin en önemli sismik kaynaklarından biri olarak kabul edilen Tuzla Fayının tarihsel davranışını analiz etmek amacıyla, üç geometrik segmenti üzerinde fay skarpı boyunca üç hendek tabanlı paleosismoloji çalışması yürütmüşlerdir. Yapılan çalışmada OSL tekniği ile örnekleri tarihlendirmişler ve Paleosismolojik bulgular ışığında fay tarafından yedi tarihi/tarih öncesi depremin üretildiğini tespit etmişlerdir. Tuzla Fayı’nda bir depremin yinelenme aralığının 700 yıl ile 4300 yıl arasında, en son yüzey faylanması depreminden bu yana geçen sürenin 1844 yıl olduğunu tespit etmişler ve buna bağlı olarak çalışılan fayın yakın gelecekte, özellikle sismik boşluk olarak değerlendirilebilecek Orhanlı ve Çatalca segmentlerinde yıkıcı depremler üretme potansiyeline sahip olduğunu öngörmüşlerdir. Benzer şekilde yapılan çalışmalar incelendiğinde OSL tarihlendirme yönteminin, geç Kuvaterner çökellerinin çökme yaşını belirlemek (Preusser vd., 2008; Mahan vd., 2022) ve kama, kolüvyon ve son çökelleri doğrudan tarihlendirmek (Spencer vd. 2019; Fattahi vd. 2010) için en iyi bilinen ve en uygun tarihlendirme tekniklerinden biri

olduğu söylenebilir ki dünyadaki paleosismoloji çalışmalarına başarıyla uygulanmış olması da bunun bir kanıtıdır (Rittase vd. 2014; Stahl vd. 2016; Jayangondaperumal vd. 2017).

Deprem gerçeği ile yaşamak durumunda olan ülkemizde deprem özel çağruları ile birçok fay segmenti paleosismolojik olarak incelenmeye başlanmış bulunmaktadır. Ayrıca yakın zamanda meydana gelen yıkıcı depremler nedeniyle henüz paleosismolojik çalışma yapılmamış olan ve deprem üretme ihtimali bulunan faylar üzerinde de çalışmalar başlatılmış olup geniş kapsamlı araştırmalar yapılacak olan projelere farklı araştırma grupları tarafından başlanmıştır. Türkiye genelinde yürütülen bu araştırma projelerinde tarihlendirme ile ilgili verilerin de oldukça önemli olduğu bir gerçektir. Bu bağlamda yapılan bu çalışmanın ilk aşamasında, paleosismolojik çalışmalar için hendeklerin açılmasından OSL örneklerinin alınmasına ve alınan örneklerin yaşlarının hesaplanmasına kadar geçen süreçte yapılan tüm çalışmalar ve hesaplamalar teorik olarak kısaca sunulmuştur. Çalışmanın ikinci aşamasında, deneysel çalışmalarla laboratuvar ortamında iyonlaştırıcı radyasyona maruz bırakılarak yaşlandırılan üç farklı kuvars örneğinin OSL tarihlendirme yöntemi ve SAR protokolü kullanılarak yaşlarının hesaplanması çalışmaları yapılmıştır. Son olarak yaş hesaplamalarına karışan hatalar değerlendirilmiş ve OSL tarihlendirme yönteminin uygulanması aşamalarında dikkat edilmesi gereken noktalar öneri olarak sunulmuştur.

MATERYAL VE METOD

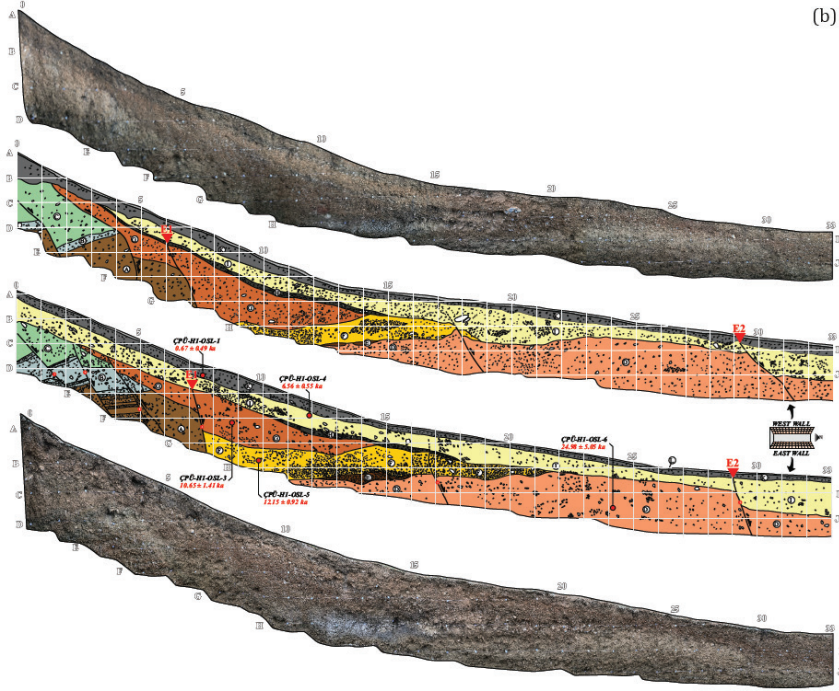
Paleosismolojik Hendeklerin Açılması

OSL tarihlendirmede kullanılacak olan örneklerin alınması aşamasından önce yüzey kırığı oluşturmuş ve deprem üreten diri fayların

yerlerinin belirlenip fay uzanımlarına dik ya da paralel olacak şekilde paleosismolojik hendekler iş makineleri ile açılarak hendek içi ve hendek duvarları temizlenir. Fay kesitlerinin ve eski depremlerin etkisi ile meydana gelmiş olayların net bir şekilde görüntülenebilmesi için hendek açımı sırasında meydana gelen kepçe izlerinin temizlenmesi gerekmektedir. Hendek duvarlarının çizimini kolaylaştırmak için her iki duvar için de ip ve çiviler kullanarak hendek duvarlarını karelere bölme (karelaj, grid oluşturma) işleminin yapılması ve uygun şekilde her bir gridin köşe noktalarının seviye seviye etiketlenmesi işlemi gerçekleştirilir. Karelajı tamamlanan hendeklerin her iki duvarının yapısını, fay kesitlerini, fayda meydana gelmiş eski depremlere ait olaylara göre tarihlendirme örneklerinin alınacağı noktaları ve fay üzerindeki olayları ayrıntılı olarak gösteren çizimler log kağıtlarına yapılır ve daha sonra bu çizimler grafik tasarım programları kullanılarak bilgisayar ortamına aktarılır. Hendeklerin örnek alınmasına hazırlanması ile ilgili bu süreçlere örnek olabilecek bir görsel ve örnek bir log çizimi (Duran vd., 2021) Şekil 2b'de görülmektedir.

OSL Tarihlendirme İçin Örneklerin Alınması

OSL tarihlendirmede kullanılacak örneklerin alınması aşamasında, karotlar daha önce belirlenmiş olan ve fayda meydana gelen eski depremlere ait olayların analiz edileceği uygun yerlere çakılır. Karotun içinin tamamen toprakla dolup dolmadığı kontrol edilerek tamamen toprakla dolmuşsa karot çıkarılır. Çıkarılan karotun ışık almayacak şekilde paketlenmesi ve paketin üzerine örnek kodlarının yazılması bu aşamada yapılması gereken önemli işlemlerden biridir. Örneğin alındığı karot boşluğunun içinden yıllık doz hesabında kullanılacak olan örnekler de alınmalıdır (Şekil 3).



Şekil 2. (a) Paleosismolojik hendeklerin açılması, temizlik, karelej ve (b) loglama süreçleri.

Figure 2. The processes of (a) opening paleoseismological trenches, cleaning, gridding and (b) logging.

Örneklerin OSL Ölçümlerine Hazırlanması ve Yıllık Doz

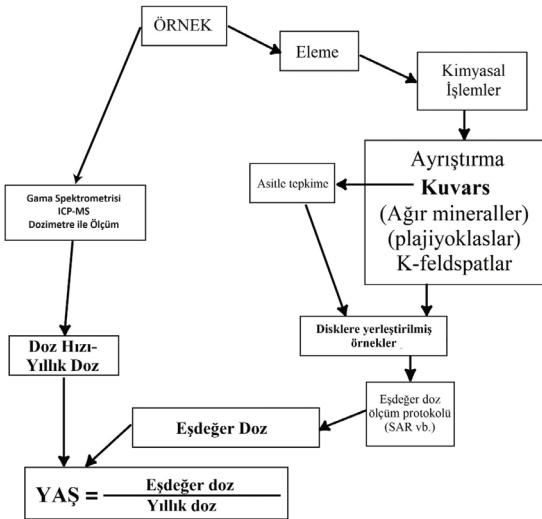
Fay segmentlerinden alınan örneklerin eşdeğer dozlarının (D_e) hesaplanması için gerekli olan OSL ölçümlerine ve yıllık doz

hesaplamalarına (ya da ölçümlerine) hazır hale getirilmesi için laboratuvarında bir takım hazırlık süreçleri bulunmaktadır. Bu süreçlere ait genel Türkçeleştirilmiş ve düzenlenmiş şema Şekil 4'te verilmiştir (Cordier vd., 2010).



Şekil 3. Hendeklerden OSL ve yıllık doz örneklerinin alınması, paketlenmesi ve kodlanması.

Figure 3. Collection, packaging and coding of OSL and annual dose samples from trenches.



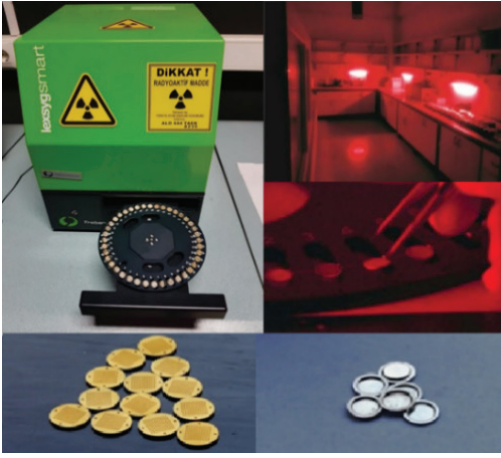
Şekil 4. OSL ölçümleri için örneklerin hazırlanması, yıllık dozların ve yaşın hesaplanması.

Figure 4. Preparation of samples for OSL measurements, calculation of annual doses and age.

Şekil 4'te de görüldüğü gibi OSL ölçümleri yapılacak olan örneklerin eleme, kimyasal işlemler, farklı asitlerle tepkimeler gibi bir

süreçten geçirilmesi ve bu süreç boyunca ışık görmemesi gerekmektedir. Bu nedenle bu işlemlerin tamamen karanlık bir laboratuvar ortamında ve kırmızı ışık altında yapılması önemlidir (Şekil 5). Örneklerin bu süreçte ışık görmesi, hesaplanacak yaşın gerçek yaştan daha genç olmasına neden olacak ve hata artacaktır. Laboratuvardaki bu hazırlık süreci sonunda kuvars ya da feldspat gibi minerallerin ayrıştırılmış olması gerekmektedir. Örneklerden ayrıştırılan mineralin hangi mineral olduğu OSL ölçümleri sırasında kullanılacak olan uyarım kaynağı ve kullanılacak olan filtrenin seçiminin doğru yapılmasında önemli bir etkidir. Örneğin kuvars için mavi (Blue-OSL) ve feldspat için kızılötesi (IRSL) ışıkla uyarım yapılması gerekirken benzer şekilde kuvars için Hoya U-340 (UV) ve feldspat için de Corning 7-59 ile Schott BG-39 filtre kombinasyonlarının (Bejarano-Arias vd., 2023) kullanılması önemlidir. Örneklerin ayrıştırılmasından sonra elde edilen mineralin kuvars, feldspat ya da kuvars-feldspat karışımı olup olmadığını da test edilmesi seçilecek olan OSL ölçüm protokolünü belirlemektedir. Bu nedenle elde edilen mineralin OSL ölçümü için hazırlanıp ölçüm yapılarak IRSL/OSL sinyal şiddetleri oranına göre mineralden emin olunması gerekmektedir. Sinyal şiddetleri oranı 0.1'den küçükse mineral saf kuvarstır (Duller, 2003; Yüksel, 2018) ve kuvars için seçilmesi gereken protokoller uygulanabilir. OSL ölçümlerinden elde edilen veriler kullanılarak hesaplanacak olan eşdeğer doz değerlerinin en az hata ile hesaplanabilmesi için mutlaka istatistiksel değerlendirmeler yapılmalıdır. Bu nedenle her bir örnek grubundan istatistiksel değerlendirmeye imkan verecek sayıda ve mümkün olduğunca çok sayıda örnek ölçüm diskleri hazırlanmalıdır. Uygun protokolün seçimi ve OSL ölçümlerinin yapılmasından sonra -örneğin SAR protokolü- elde edilen

termolüminesans (TL) ve OSL eğrilerinin analizi ile eşdeğer doz hesaplanabilmektedir. Kuvars için en çok tercih edilen ölçüm protokolü SAR protokolü (Şekil 6) olup ölçüm yapılan örnek için uygun test dozu, kesme sıcaklığı, ön ısıtma sıcaklığı ve ısıtma hızı gibi değişken parametrelerin titizlikle ayarlanması, gerekiyorsa deneysel olarak belirlenmesi yaşa karışacak hatayı en aza indirebilmek için -özellikle çok genç ya da çok yaşlı örnekler için- önemlidir.

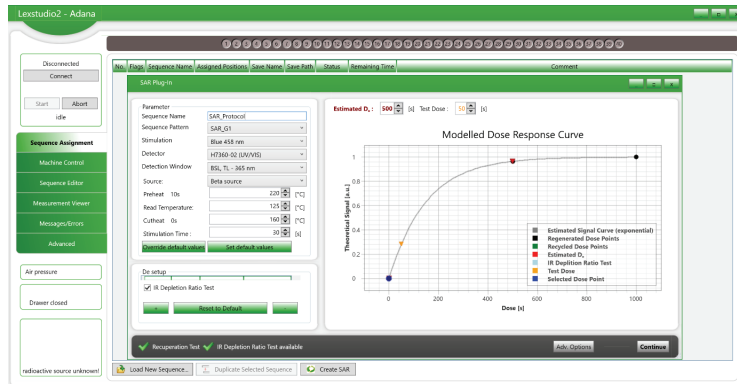


Şekil 5. Örnek hazırlama ve OSL ölçümü için kullanılan laboratuvarlardan bir örnek.

Figure 5. An example of laboratories used for sample preparation and OSL measurement.

Yıllık doz ölçümleri, indüktif eşleşmiş plazma-kütle spektrometresi (ICP-MS) ve gama spektrometresi kullanılarak yapılabildiği gibi pasif dozimetrelerin (TLD ya da OSLD) örnek alım noktalarına gömülmesi ile de yapılabilmektedir. Ancak pasif dozimetrelerin tercih edilmesi durumunda dozimetrelerin 1 yıl gibi bir süre örnek alım noktasında kalması ve sonra çıkarılarak ölçüm yapılması gerektiğinden bu yöntemin paleosismoloji çalışmalarında kullanımı pek uygun değildir. ICP-MS ölçümleri, numunenin ppm olarak uranyum (U), toryum (Th) ve % ağırlık olarak potasyum (K_2O) miktarlarının ve gama spektrometresi ölçümleri de benzer şekilde U, Th ve K kaynaklı doğal aktivitelerin (Bq/kg olarak) belirlenmesi amacı ile yapılmaktadır. ICP-MS ölçümleri gama spektrometresi ölçümlerine göre daha kısa sürede yapılabildiğinden son yıllarda tercih sebebi olmuştur. Ancak doğal radyoaktif izotopların miktarlarının/aktivitelerinin belirlenmesi yıllık dozu doğrudan vermediğinden elde edilen bu veriler yardımıyla ayrıca hesaplanması gerekmektedir.

Yaş hesaplamalarında kullanılan temel formül eşitlik (1)'de ve formülün en spesifik hali ise eşitlik (2)'de verilmiştir.



Şekil 6. OSL ölçümleri için SAR protokolü parametrelerinin ayarlanması.

Figure 6. Setting SAR protocol parameters for OSL measurements.

$$Yaş = \frac{Eşdeğer\ doz\ (D_e)}{Yıllık\ doz\ (D)} \quad (1)$$

$$Yaş = \frac{D_e}{w(\alpha D_\alpha + D_\beta + D_\gamma) + D_c} \quad \text{ve} \quad D_c = D_0 \left[F + J e^{\left(\frac{t}{T}\right)} \right] \quad (2)$$

Yukarıda verilen eşitliklerde:

w: Doymuş su içeriği, α : Alfa verimliliği, D_α : Alfa parçacıklarından kaynaklı doz, D_β : Beta parçacıkları kaynaklı doz, D_γ : Toplam gama dozu ve D_c : Kozmik radyasyon dozudur.

Yaşa karışabilecek hataların en aza indirebilmesi için doymuş su içeriğinin deneysel olarak ve kozmik radyasyon dozunun da mutlaka ilgili parametreler kullanılarak hesaplanması gerekmektedir.

Deneysel Çalışmalar

Kuvars örneklerinin OSL ölçümüne hazırlanması

Bilindiği üzere, OSL tarihlendirme çalışmalarında çoğunlukla kuvars ve feldspat mineralleri kullanılmaktadır. Örneğin fay segmentleri içerisinde bulunan kuvars mineralleri deprem meydana gelmesi ve yüzey kırıklarının oluşması sonucunda gün ışığı görmekte ve daha sonra tekrar gömülmektedir. Gün ışığını görmesi ile sıfırlanan lüminesans saati mineralin yeniden gömülmesi ile birlikte toprakta bulunan doğal radyoaktif izotoplardan ve kozmik radyasyondan kaynaklı olarak iyonlaştırıcı radyasyona maruz kalmaktadır. Mineralin ışık ya da ısı göreceği bir başka olay meydana gelene kadar bu radyasyon maruziyeti mineralin yapısında enerjinin yeniden birikimine sebep olmakta ve lüminesans saati maruziyet süresi boyunca yeniden çalışmaktadır. Yapılan bu çalışmada da kuvars örnekleri kullanılmış ve aşağıda yer alan örnek hazırlama süreçleri uygulanmıştır.

Deneysel çalışmalarda kullanılacak olan kuvars örnekleri tanecik boyutları 150-250 μm arasında olacak şekilde eleklerle elenmiştir.

Elenen numuneler her biri $m=5\pm 0.3$ mg olacak şekilde hassas terazi ile tartılarak kenarlıklı ölçüm disklerine silikon yağı kullanılarak yapılandırılmış ve bu şekilde 63 adet örnek ölçüme hazır hale getirilmiştir. Ölçüme hazırlanan örnekler için yıllık doz vb. veriler Çizelge 1'de sunulmuştur. Hazırlanan örneklerin lüminesans saatleri, laboratuvar ortamında hem yüksek sıcaklıklarda tavlansarak (450°C 'de 1 saat) hem de mavi ışıkla uyarım yapılarak sıfırlanmıştır. Ölçüme hazırlanmış olan örnekler 21 diskten oluşan üç gruba (M1, M2 ve M3) ayrılarak deneysel çalışmalara başlanmıştır.

Numunelerin normal şartlarda toprak altında gömülü oldukları zaman zarfında maruz kalacakları radyasyonun bir temsili olacak şekilde radyasyona maruz bırakılmaları ya da diğer bir deyişle laboratuvar ortamında yaşlandırma işlemi Şekil 5'te de görülen lexsyg smart TL/OSL cihazı içerisinde bulunan $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ beta kaynağı ile her bir grup ayrı ayrı olacak şekilde yapılmıştır. Hazırlanan M1, M2 ve M3 örnek grupları sırasıyla 3, 15 ve 50 Gy'lik radyasyon dozlarına maruz kalacak şekilde cihaz içerisinde ışınlanmıştır.

Çizelge 1. Örneklere ait yıllık doz değerleri ve hazırlanan disk sayıları.

Table 1. Annual dose values of samples and number of aliquots prepared.

Örnek adı	Yıllık doz (mGy)	Disk sayısı
M1	3.2	21
M2	2.4	21
M3	2.1	21

SAR protokolü

OSL ölçümleri için kuvars mineralinin kullanıldığı çalışmalarda kuvars içerisinde

depolanmış olan radyasyon kaynaklı enerjinin serbest bırakılması olayı mavi ışıkla uyarım yapılarak sağlanmakta ve bu uyarım sonucunda elde edilen lüminesans ışığı uygun detektörlerle kaydedilerek OSL bozunum eğrileri elde edilebilmektedir. OSL tarihlendirme çalışmalarının gelişim sürecinde elde edilen önemli veriler ışığında SAR protokolü kuvars minerali içindeki eşdeğer radyasyon dozlarını ölçmek için kullanılabilir en başarılı yaklaşım olarak belirlenmiştir (Wintle ve Murray, 2006).

Bu çalışmada, OSL ölçümü için kullanılan SAR protokolü için test dozu 4.5 Gy, ön ısıtma sıcaklığı 220°C, kesme sıcaklığı 160°C ve ısıtma hızı da 5°C/s olarak ayarlanmış ve kullanılan SAR protokolüne ait adımlar Çizelge 2’de sunulmuştur.

BULGULAR VE TARTIşMA

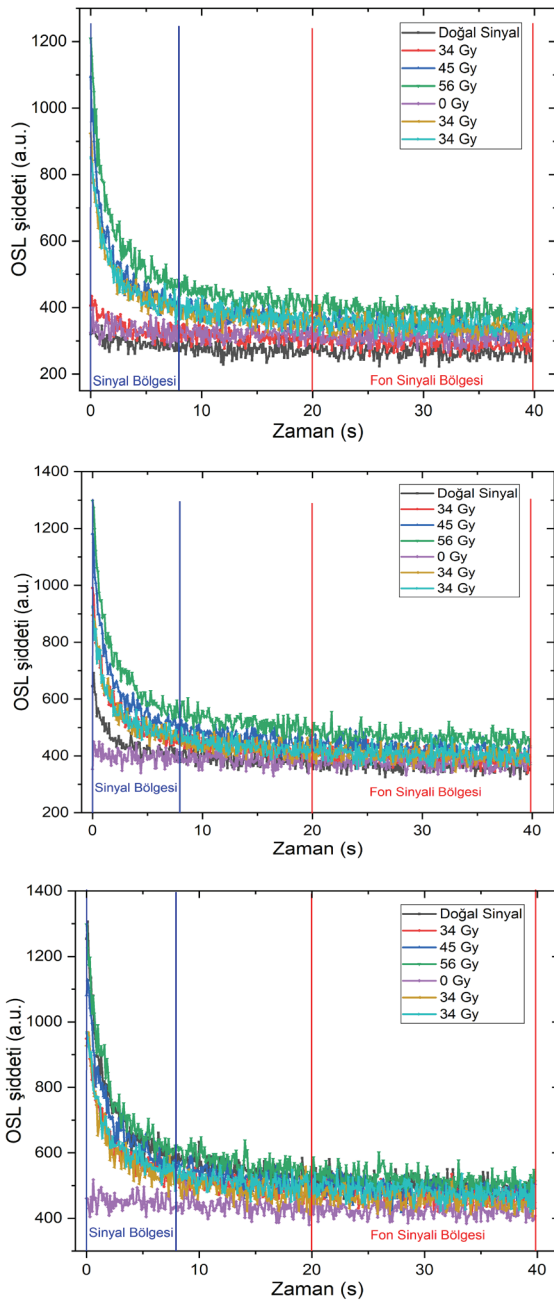
M1, M2 ve M3 örneklerinin OSL eşdeğer doz ölçümleri Çizelge 2’de verilen SAR protokolü uygulanarak yapılmış ve her bir gruptan seçilen birer örnekten elde edilen OSL bozunum eğrileri grafikleri Şekil 7’de gösterilmiştir.

Şekil 7’de kuvars örneklerine ait doğal -eşdeğer doza karşılık- ve doz yenileme noktalarında elde edilen (34, 45 ve 56 Gy için) OSL sinyalleri görülmektedir. Ayrıca net OSL sinyalini elde etmek için kullanılan sinyal bölgesi ve fon sinyali bölgeleri de şekillerde verilmiştir. Net OSL sinyali elde edilirken sinyal bölgesinden elde edilen değerden fon sinyali bölgesinden elde edilen değer çıkarılmıştır. Sinyal ve fon sinyali bölgeleri analizler yapılırken araştırmacılar tarafından değiştirilebilmekte olup bu bölgelerin doğru seçilmesi hesaplanacak olan eşdeğer doza karışabilecek hataları en aza indirecektir. Elde edilen bu grafiklere bağlı olarak eşdeğer dozun hesaplanması için kullanılan Analyst programında elde edilen sonuçlar Şekil 8’de görülmektedir.

Çizelge 2. Kuvars için uygulanan SAR protokolü.

Table 2. SAR protocol applied to quartz.

Adım	Süreç	Gözlem
1	Ön ısıtma 220°C, 10 s	
2	Mavi LED’le uyarma (125°C, 80 s)	L_n
3	Test dozu (4.5 Gy)	
4	Kesme sıcaklığı TL (160°C, 5°C/s)	
5	Mavi LED’le uyarma (125°C, 80 s)	T_n
6	Doz (Işınlama)	Doz yenileme 1
7	Ön ısıtma 220°C, 10 s	
8	Mavi LED’le uyarma (125°C, 80 s)	L_x
9	Test dozu (4.5 Gy)	
10	Kesme sıcaklığı TL (160°C, 5°C/s)	
11	Mavi LED’le uyarma (125°C, 80 s)	T_x
12	Adım 6’ya dönüş	



Şekil 7. M1, M2 ve M3 örneklerine ait OSL bozunum eğrileri.

Figure 7. OSL decay curves of samples M1, M2 and M3.

Şekil 8’de görülen ED (s) değerleri, saniye cinsinden eşdeğer dozlara karşılık gelmekte

olup cihazda bulunan radyasyon kaynağının doz hızı ile (0.1 Gy/s) çarpıldığında eşdeğer dozları soğurulmuş doz birimi (Gy) cinsinden vermektedir.

Şekilde görülen diğer bir değer ise tekrarlanabilirlik oranı (Recycling) olarak adlandırılan ve R6/R1 değerine karşılık gelen temel tekrar oluşturma ölçümünden sonra ilk tekrar oluşturma dozunun tekrarlanmasıyla kontrol edilmesi gereken hassaslık düzeltmesidir ki bu değer de yaklaşık 1.0 civarında olması beklenmektedir (Murray ve Wintle, 2000).

Şekil 8’de de görüldüğü gibi yapılan ölçümlerden elde edilen tekrarlanabilirlik oranları M1, M2 ve M3 için sırasıyla 1.00 ± 0.11 , 1.05 ± 0.14 ve 1.01 ± 0.11 şeklinde olup üç örnek grubu için de hassaslık düzeltmelerinin uygun ve kabul edilebilir olduğu söylenebilir.

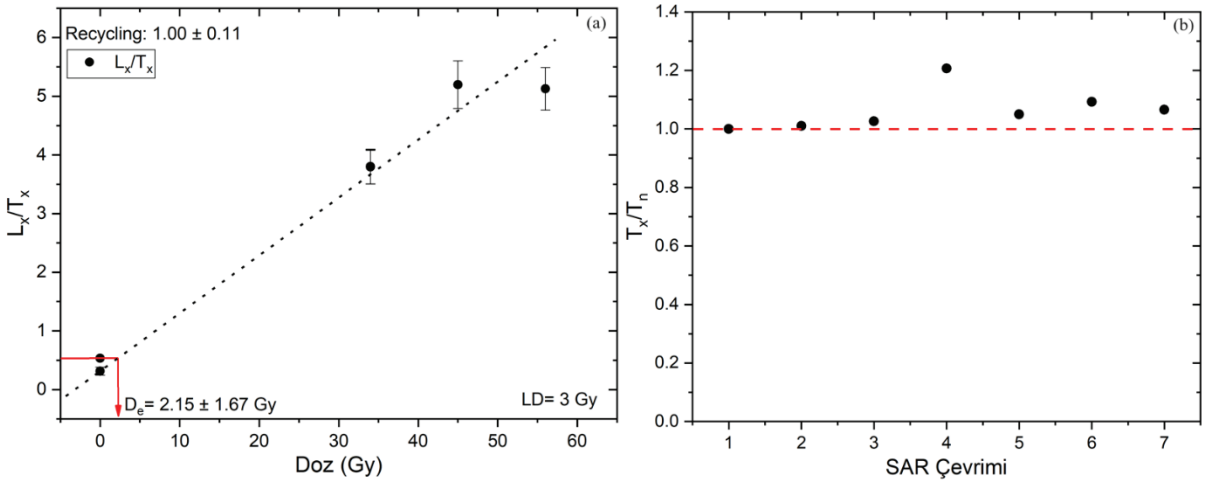
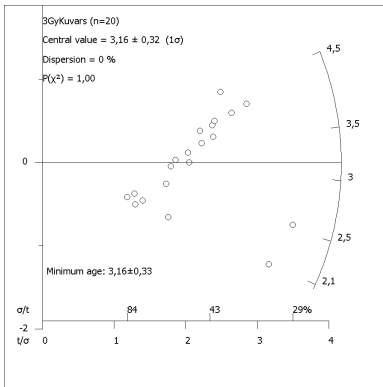
M1 örnek grubunda yer alan ve laboratuvarında 3 Gy’lik radyasyon dozuna ($LD=3$ Gy) maruz bırakılarak yaşlandırılan örneklerden birine ait olan L_x/T_x doz/cevap (büyüme) ve SAR çevrimine karşılık T_x/T_n (test dozu sonrası OSL sinyalinin doğal OSL sinyaline oranı) grafikleri Şekil 9’da görülmektedir.

Şekil 9a’da görülen grafikten faydalanarak M1 örneklerinden birine ait olan eşdeğer doz (D_e) 2.15 ± 1.67 Gy olarak hesaplanmıştır. M1 grubu örneklerinde tek bir diske ait olan bu eşdeğer doz sonucunun gerçek doza ($LD=3$ Gy) göre yüzde hatası 28.33’tür. M1 örnek grubuna ait yıllık doz değeri 3.2 mGy olup bu örneğin yaşı, 671.88 ± 521.88 yıl olarak hesaplanmıştır. Eşdeğer dozdaki yüzde hata oldukça yüksek bir değer olduğundan herhangi bir istatistik dağılım yapılmadan tek bir örnekle hesaplanan bu yaş değerinin hata payı oldukça yüksek olup gerçek yaşı (940 ± 65.8 yıl) vermemektedir. M1 örnek grubundan hazırlanmış olan 20 adet diskten elde edilen eşdeğer dozların radyal dağılım grafiği Şekil 10’da görülmektedir.

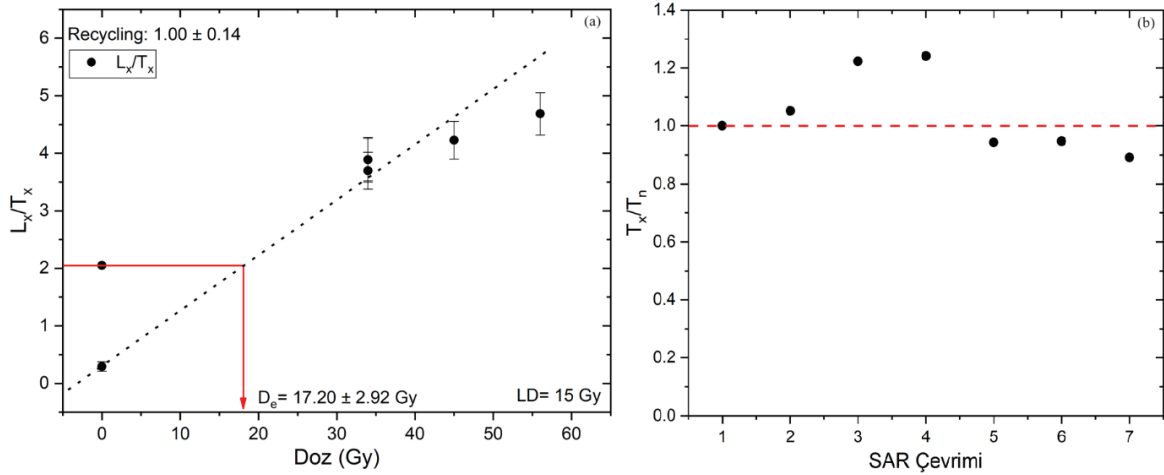
Results	Results	Results
ED (s): 21.52 ± 16.56 (a)	ED (s): 192.03 ± 29.15 (b)	ED (s): 527.51 ± 41.51 (c)
Recycling:	Recycling:	Recycling:
1.00± 0.11 (R 5/R 1)	1.05± 0.14 (R 5/R 1)	1.01± 0.11 (R 5/R 1)
1.00± 0.11 (R 6/R 1)	1.05± 0.14 (R 6/R 1)	1.01± 0.11 (R 6/R 1)
1.00± 0.11 (R 6/R 5)	1.00± 0.14 (R 6/R 5)	1.00± 0.11 (R 6/R 5)

Şekil 8. M1, M2 ve M3 örnekleri için eşdeğer doz ve tekrarlanabilirlik sonuçları.

Figure 8. Equivalent dose and recycling results for samples M1, M2 and M3.

Şekil 9. (a) L_x/T_x büyüme (doz/cevap) ve (b) SAR çevrimine karşılık T_x/T_n grafikleri.Figure 9. (a) L_x/T_x growth (dose/response) and (b) T_x/T_n versus SAR cycle graphs.Şekil 10. M1 örneklerinin eşdeğer doz (D_0) dağılımının radyal grafiği.Figure 10. Radial plot of equivalent dose (D_0) distribution of M1 samples.

Şekil 10'da da görüldüğü gibi 20 diskten elde edilen dağılıma göre merkezi eşdeğer doz değeri 3.16 ± 0.32 Gy ve minimum eşdeğer doz değeri 3.16 ± 0.33 Gy'dir. Elde edilen merkezi eşdeğer dozun gerçek doza ($LD=3$ Gy) göre yüzde hatası 5.33'tür. Bu değere bağlı olarak M1 örnek grubunun OSL yaşı, 987.50 ± 100 yıl olarak hesaplanmış olup gerçek yaş (940 ± 65.8 yıl) ile hata sınırları içerisinde tutarlıdır. Elde edilen sonuçlardan da görüldüğü gibi OSL yaşları hesaplanırken eşdeğer doz ya da yaşlara ait dağılım grafikleri çizilmeli ve hangi yaklaşımın kullanılacağı (merkezi ya da minimum yaş modelleri) ile ilgili değerlendirmeler mutlaka yapılmalıdır.



Şekil 11. (a) L_x/T_x büyüme (doz/cevap) ve (b) SAR çevrimine karşılık T_x/T_n grafikleri.

Figure 11. (a) L_x/T_x growth (dose/response) and (b) T_x/T_n versus SAR cycle graphs.

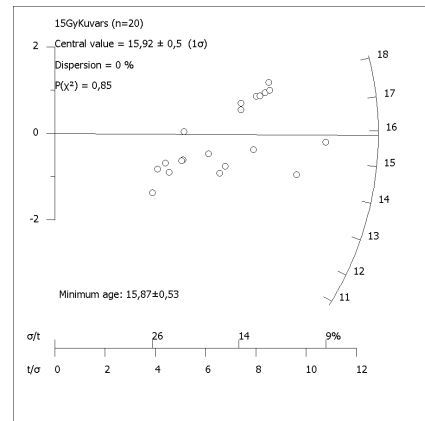
M2 örnek grubunda yer alan ve laboratuvarda 15 Gy'lik radyasyon dozuna (LD=15 Gy) maruz bırakılarak yaşlandırılan örneklerden birine ait olan L_x/T_x doz/cevap (büyüme) ve SAR çevrimine karşılık T_x/T_n grafikleri Şekil 11'de görülmektedir.

Şekil 11a'da görülen grafikten faydalanarak M2 örneklerinden birine ait olan eşdeğer doz (D_e) 17.20 ± 2.92 Gy olarak hesaplanmıştır. Bu eşdeğer doz sonucunun gerçek doza (LD=15 Gy) göre yüzde hatası 14.67'dir. M2 örnek grubuna ait yıllık doz değeri 2.4 mGy olduğundan bu örneğin yaşı, 7166.67 ± 1216.67 yıl olarak hesaplanmıştır. Eşdeğer dozdaki yüzde hatanın yüksek olması ve tek bir örnekle yaş hesaplanması nedeniyle elde edilen bu yaş değerinin laboratuvar şartlarında yaşlandırılan örneğin gerçek yaşını (6230 ± 323.96 yıl) vermediği görülmektedir.

M2 örnek grubundan hazırlanmış olan 20 adet diskten elde edilen eşdeğer dozlar kullanılarak oluşturulan radyal dağılım grafiği Şekil 12'de görülmektedir.

Şekil 12'de de görüldüğü gibi 20 diskten elde

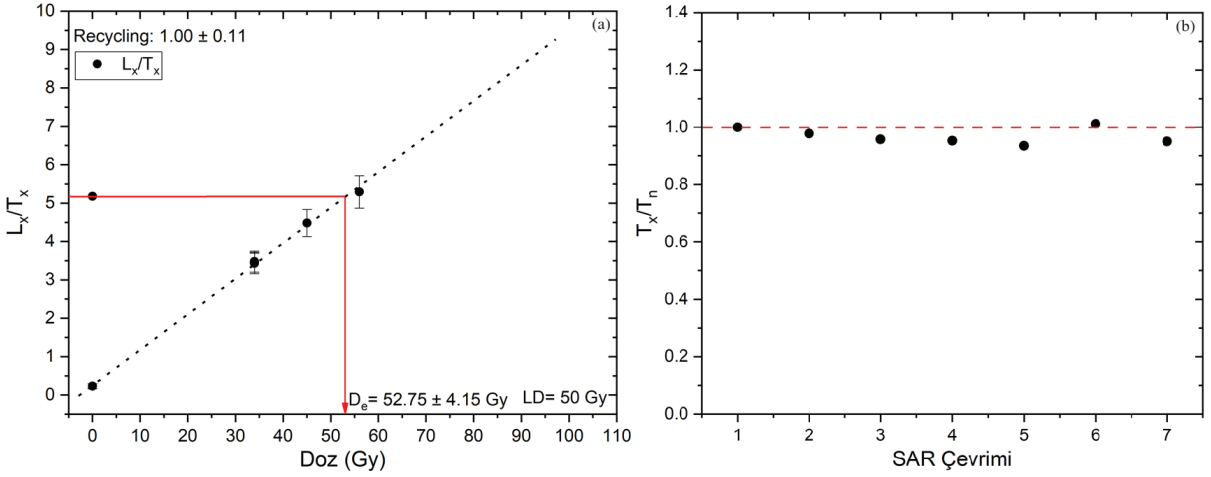
edilen dağılıma göre merkezi eşdeğer doz değeri 15.92 ± 0.5 Gy ve minimum eşdeğer doz değeri 15.87 ± 0.53 Gy'dir. Elde edilen merkezi eşdeğer dozun gerçek doza (LD=3 Gy) göre yüzde hatası 6.13'tür. Bu değere bağlı olarak M2 örnek grubunun OSL yaşı, 6633.33 ± 208.33 yıl olarak hesaplanmış olup gerçek yaş (6230 ± 323.96 yıl) ile hata sınırları içerisinde tutarlıdır.



Şekil 12. M2 örneklerinin eşdeğer doz (D_e) dağılımının radyal grafiği.

Figure 12. Radial plot of equivalent dose (D_e) distribution of M2 samples.

Yüksel



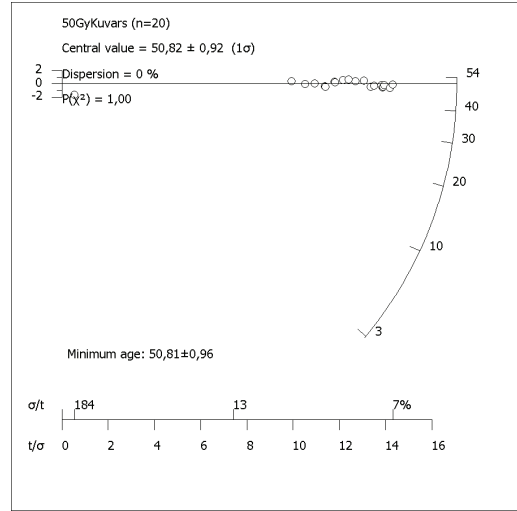
Şekil 13. (a) L_x/T_x büyüme (doz/cevap) ve (b) SAR çevrimine karşılık T_x/T_n grafikleri.

Figure 13. (a) L_x/T_x growth (dose/response) and (b) T_x/T_n versus SAR cycle graphs.

M3 örnek grubunda yer alan ve laboratuvarıda 50 Gy'lik radyasyon dozuna ($LD=50$ Gy) maruz bırakılarak yaşlandırılan örneklerden birine ait olan L_x/T_x doz/cevap (büyüme) ve SAR çevrimine karşılık T_x/T_n grafikleri Şekil 13'te görölmektedir.

Şekil 13a'da görölen grafikten faydalanarak M3 örneklerinden birine ait olan eşdeğer doz (D_e) 52.75 ± 4.15 Gy olarak hesaplanmıştır. Bu eşdeğer doz sonucunun gerçek doza ($LD=50$ Gy) göre yüzde hatası 5.5'tir. M3 örnek grubuna ait yıllık doz değeri 2.1 mGy olduğundan bu örneğin yaşı, 25119.05 ± 1976.19 yıl olarak hesaplanmıştır. Eşdeğer dozdaki yüzde hatanın kabul edilebilir bir değere sahip olması M3 örnek grubu içerisinde seçilen bu örneğe ait eşdeğer dozun dağılımda merkezi eşdeğer doz değerine yakın bir sonuç vermesinden kaynaklanmaktadır. Çalışılan önceki örneklerde göröldüğü gibi deneysel çalışmalarda her zaman bu şekilde ortalama değeri yansıtan bir sonuçla karşılaşmak mümkün olamayabilir. Bu nedenle OSL yaşları hesaplanırken mümkün olduğunca fazla örnek diski hazırlanmalı ve dağılım grafikleri çizilerek şans faktörüne güvenilmemelidir.

M3 örnek grubundan hazırlanmış olan 20 adet diskten elde edilen eşdeğer dozlar kullanılarak oluşturulan radyal dağılım grafiği Şekil 14'te görölmektedir.



Şekil 14. M3 örneklerinin eşdeğer doz (D_e) dağılımının radyal grafiği.

Figure 14. Radial plot of equivalent dose (D_e) distribution of M3 samples.

Şekil 14'te de görüldüğü gibi 20 diskten elde edilen dağılıma göre merkezi eşdeğer doz değeri 50.82 ± 0.92 Gy ve minimum eşdeğer doz değeri 50.81 ± 0.96 Gy'dir. Elde edilen merkezi eşdeğer dozun gerçek doza ($LD=50$ Gy) göre yüzde hatası 1.64'tür. Bu değere bağlı olarak M3 örnek grubunun OSL yaşı, 24200 ± 438.09 yıl olarak hesaplanmış olup gerçek yaş (24000 ± 715 yıl) ile hata sınırları içerisinde tutarlıdır.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, OSL tarihlendirme yönteminin deprem araştırmaları kapsamındaki paleosismoloji çalışmalarında kullanımı ile ilgili genel bilgiler verildikten sonra laboratuvarında yapay olarak 3, 15 ve 50 Gy radyasyon dozları ile ışınlanarak sırasıyla 940 ± 65.8 yıl (M1), 6230 ± 323.96 yıl (M2) ve 24000 ± 715 yıl (M3) yaşlandırılan kuvars örneklerinin OSL yaşları SAR protokolü kullanılarak hesaplanmıştır. Hesaplamalar M1, M2 ve M3 örnek gruplarının her biri için hem 1 hem de 20 örnek diskinden oluşan örneklerle yapılmış ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalarla elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

940 ± 65.8 yıl yaşındaki M1 örnek grubu için tek disk kullanılarak yapılan OSL ölçümleri ve hesaplamalarla örneğin yaşı, %28.52 hata ile 671.88 ± 521.88 yıl olarak hesaplanmıştır. 20 disk kullanılarak yapılan OSL ölçümleri ve istatistiksel analizler sonucunda yapılan hesaplamalarla ise örneğin yaşı, %5.05 hata ile 987.50 ± 100 yıl olarak hesaplanmış olup kabul edilebilir sınırlar içerisinde bir yaştır.

6230 ± 323.96 yıl yaşındaki M2 örnek grubu için tek disk kullanılarak yapılan OSL ölçümleri ve hesaplamalarla örneğin yaşı, %15.03 hata ile 7166.67 ± 1216.67 yıl olarak hesaplanmıştır. 20 disk kullanılarak yapılan OSL ölçümleri

ve istatistiksel analizler sonucunda yapılan hesaplamalarla ise örneğin yaşı, %6.47 hata ile 6633.33 ± 208.33 yıl olarak hesaplanmış olup kabul edilebilir sınırlar içerisinde bir yaştır.

24000 ± 715 yıl yaşındaki M3 örnek grubu için tek disk kullanılarak yapılan OSL ölçümleri ve hesaplamalarla örneğin yaşı, %4.66 hata ile 25119.05 ± 1976.19 yıl olarak hesaplanmıştır. 20 disk kullanılarak yapılan OSL ölçümleri ve istatistiksel analizler sonucunda yapılan hesaplamalarla ise örneğin yaşı, %0.83 hata ile 24200 ± 438.09 yıl olarak hesaplanmış olup kabul edilebilir sınırlar içerisinde bir yaştır.

Deprem araştırmaları kapsamında yapılan paleosismoloji çalışmalarında en çok tercih edilen tarihlendirme yöntemlerinden biri olan OSL tarihlendirme yönteminin yaş hesaplamalarında kullanımı ve örnek alım süreçleri ile ilgili öneriler aşağıda sunulmuştur.

Güncel çalışmalar ışığında lüminesans tarihlendirme yöntemleri ile 50 yıl ile 1 milyon yıl arasındaki zaman ölçeğinde tarihlendirme imkanı sunmakta olup bu zaman ölçeğinde sınırlara doğru yaklaştıkça hata paylarının arttığı mutlaka göz önüne alınmalı, çok genç ve çok yaşlı örneklerle yapılan çalışmalarda daha titiz davranılmalıdır.

Örneklerin doymuş su içeriği yıllık doz hesaplamalarında önemli bir parametre olduğu (Softa ve Utku, 2022) için örnek alımları mümkün olduğunca zeminin kuru olduğu dönemlerde yapılmalı ve örnek alım çalışmaları sırasında hendekler ıslatılmamalıdır. Böylece yaşa karışacak hata payı da azalmış olacaktır.

Hendeklerden OSL örnekleri alınırken fay düzlemleri ve fayda meydana gelmiş olan olaylar mümkün olduğunca dikkatli analiz edilmeli örnek alım noktaları titizlikle seçilmelidir.

Çalışma tamamlandıktan sonra yeniden örnekleme yapılmasının güç olması nedeni ile hendeklerden OSL örnekleri alınırken karotun tam olarak dolduğundan emin olunmalı ve karot içerisindeki örneklerin ışık görmemesi sağlanmalıdır. Ayrıca alınan örneklerin kodlanması ve log kağıtlarında bu kodun doğru yerde işaretlenmesi de önemlidir.

OSL ölçümleri ve eşdeğer doz hesaplamaları için karot içerisindeki örneklerden yeterince kuvars/feldspat vb. mineral elde edilememe riski düşünülerek yıllık doz hesaplamalarında kullanılacak örnekler karotun çakıldığı boşluklardan ayrıca alınmalı ve paketlenmelidir.

Alınan örneklerden kuvars veya feldspat ayırıştırma çalışmaları yapılırken kırmızı ışıkla aydınlatılmış bir laboratuvar ortamı kullanılmalı örneklerin asitle tepkime işlemleri sırasında ışık görmemesi için uygun ve karanlık bir ortam tercih edilmelidir.

Ayırıştırılan örneklerin hangi mineral olduğu tam olarak tespit edilmeli bunun için IRSL/OSL sinyal oranları çalışmalara başlamadan önce test edilmelidir. Mineral türüne göre OSL ölçümünde kullanılacak olan protokol, uyarım kaynağı ve filtrenin doğru bir şekilde seçilmiş olduğundan emin olunmalıdır.

OSL ölçümleri için mümkün olduğunca çok sayıda örnek hazırlanmalı yapılan ölçümlerden elde edilen eşdeğer doz ya da yaş verilerinin istatistiksel değerlendirmeleri doğru bir şekilde yapılarak en uygun yaklaşım tercih edilmeli ve hata payları minimum düzeye indirilmelidir.

Eşdeğer doz ölçüm protokolüne ait parametreler (ön ısıtma, kesme sıcaklıkları, ısıtma hızı, test dozu vb.) doğru bir şekilde seçilmeli gerekli ise bazı deneysel ölçümlerle bu parametreler belirlenmelidir.

Yıllık doz hesabında hatayı en aza indirmek için literatür verisi kullanmak yerine örneklerin doymuş su içerikleri deneylerle belirlenmeli ve kozmik radyasyon kaynaklı katkı jeomanyetik enlem ve ilgili parametreler kullanılarak hesaplanmalıdır.

KAYNAKLAR

- Aitken, M.J., (1997). Luminescence dating. Chronometric dating in archaeology. Springer, US, Boston, MA, pp 183–216
- Aitken, M.J. (1998). An Introduction to Optical Dating. Oxford University Press, Oxford.
- Atlıhan, M.A., & Meriç, N., (2008). Luminescence dating of a geological sample from Denizli, Turkey, Applied Radiation and Isotopes, 66(1), 69-74. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2007.07.020>.
- Bejarano-Arias, I., Van Wees, R.M.J., Alexanderson, H., Janočko, J., & Perić, Z.M., (2023). Testing the Applicability of Quartz and Feldspar for Luminescence Dating of Pleistocene Alluvial Sediments in the Tatra Mountain Foothills, Slovakia, Geochronometria 2023;50(1):50-80.
- Cordier, S., Frechen, M., Tsukamoto, S. (2010). Methodological Aspects on Luminescence Dating of Fluvial Sands from the Moselle Basin, Luxembourg. Geochronometria, 35, 67-74. <https://doi.org/10.2478/v10003-010-0006-4>
- Dogan, T., Cetin, H., Yegingil, Z., Topaksu, M., Yüksel, M., Duygun, F., Nur, N., & Yegingil, I., (2015). Optically stimulated luminescence dating of Holocene alluvial fans, East Anatolian Fault System, Turkey. Radiation Effects and Defects in Solids, 170(7-8), 630-644.
- Duller, G.A.T., (2003). Distinguishing quartz and feldspar in single grain luminescence measurements, Radiation Measurements, 37(2), 161-165, [https://doi.org/10.1016/S1350-4487\(02\)00170-1](https://doi.org/10.1016/S1350-4487(02)00170-1).
- Duran İ, Sözbilir H, Eski S, Softa M, Uytun H, Yüksel M., & Topaksu M., (2021). Paleoseismic history

- of the Manisa fault zone, Western Anatolia. *Turk J Earth Sci* 30(SI-1):806–832.
- Fattahi, M., Nazari, H., Bateman, M.D., Meyer, B., Se'brier, M., et al., (2010). Refining the OSL age of the last earthquake on the Dheshir fault, Central Iran. *Quat Geochronol* 5(2–3):286–292. <https://doi.org/10.1016/j.quageo.2009.04.005>
- Feathers, J., (2008). Luminescence Dating, *Encyclopedia of Archaeology*, Academic Press, 1590-1592, <https://doi.org/10.1016/B978-012373962-9.00306-X>.
- Gribkovskii, V.P., Vij, D.R., (1998). *Luminescence of Solids*, Springer, US.
- Huntley, D.J., Godfrey-Smith, D.I., & Thewalt, M.L.W., (1985). Optically dating of sediments. *Nature*, 313, 105-107.
- Huntley, D.J., Hutton, J.T. and Prescott, J.R., (1993). Optical dating using inclusions within quartz grains. *Geology*, 21(12), 1087-1090.
- Jayangondaperumal, R., Kumahara, Y., Thakur, V.C., Kumar, A., Srivastava, P., et al (2017). Great earthquake surface ruptures along backthrust of the Janauri anticline, NW Himalaya. *J Asian Earth Sci* 133:89–101
- Jull, A.J.T., (2018). *Past Glacial Environments (Second Edition)*, Chapter 19 - Geochronology Applied to Glacial Environments, Elsevier, 665-687, <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100524-8.00020-8>.
- Karabacak, V., Yönlü, Ö., Dökü, E., Kıyak, N.G., Altunel, E., Özüdoğru, Ş., Yalçın, C.Ç. & Akyüz, H.S., (2013). Analyses of Seismic Deformation at the Kibyra Roman Stadium, Southwest Turkey. *Geoarchaeology*, 28, 531-543. <https://doi.org/10.1002/gea.21456>
- Mahan, S.A., Rittenour, T.M., Nelson, M.S., Atae, N., Brown, N., DeWitt, R., Durcan, J., Evans, M., Feathers, J., Frouin, M., Guérin, G., Heydari, M., Huot, S., Jain, M., Keen-Zebert, A., Li, B., López, G.I., Neudorf, C., Porat, N., Rodrigues, K., Sawakuchi, A.O., Spencer, J.Q.G., & Thomsen, K., (2022) Guide for interpreting and reporting luminescence dating results. *GSA Bull* 135:1480–1502. <https://doi.org/10.1130/B36404.1>
- Murray, A.S., & Wintle, A.G., (2000). Luminescence Dating of Quartz using an Improved Single Aliquot Regenerative-Dose Protocol. *Radiation Measurements* 32 (1): 57-73. [https://doi.org/10.1016/S1350-4487\(99\)00253-X](https://doi.org/10.1016/S1350-4487(99)00253-X).
- Öncü, U., Sözbilir, H., Özkaymak, Ç., Softa M., Sümer, Ö., Eski, S., Spencer, J.Q.G., Şahiner, E., Yüksel, M., Meriç, N., & Topaksu, M., (2024). Palaeoseismological assessment for a seismic gap located very close to the epicentre of the 30 October 2020 Samos Earthquake (M6.9), western Anatolia, Turkey. *Nat Hazards* 120, 4699–4727. <https://doi.org/10.1007/s11069-023-06290-6>
- Preusser, F., Degering, D., Fuchs, M., Hilgers, A., Kadereit, A., Klasen, N., Richter, D., & Spencer, J.Q.G., (2008). Luminescence dating: basics, methods and applications. *E&G Quat Sci J* 57(1/2):95–149. <https://doi.org/10.3285/eg.57.1-2.5>
- Ran, Y., Chen, L., Chen, J., Wang, H., Chen, G., Yin, J., Shi, X., Li, C., & Xu, X., (2010). Paleoseismic evidence and repeat time of large earthquakes at three sites along the Longmenshan fault zone. *Tectonophysics*, 491(1–4), 141-153. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2010.01.009>.
- Rittase, W.M., Kirby, E., McDonald, E., Walker, J.D., Gosse, J., Spencer, J.Q.G., & Herrs, A.J., (2014). Temporal variations in Holocene slip rate along the central Garlock fault, Pilot Knob Valley, California. *Lithosphere* 6(1):48–58. <https://doi.org/10.1130/L286.1>
- Softa M, Sahiner E, Sözbilir H, Spencer JQG, Utku M, & Büyüktopçu, F., (2023). The first application of the luminescence surface exposure dating method on active fault scarps in the Western Anatolia extensional province: the Manisa Fault as an example. *Turki J Earth Sci* 32(2):163–180. <https://doi.org/10.55730/1300-0985.1836>
- Softa, M., ve Utku, M. (2022). Paleosismoloji Çalışmalarında Kolüvyal Çökellerdeki Su İçeriğinin Lüminesans Tarihlemeye Etkisinin Değerlendirilmesi; Soma-Kırkağaç Fayı'ndan Bir Örnek. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 22(2), 417-430. <https://doi.org/10.35414/akufemubid.1077643>

- Spencer, J.Q.G., Huot, S., Archer, A.W., & Caldas, M.M., (2019) Testing luminescence dating methods for small samples from very young fluvial deposits. *Methods Protoc* 2(4):90. <https://doi.org/10.3390/mps2040090>
- Stahl, T., Quigley, M.C., McGill, A., & Bebbington, M.S., (2016). Modeling earthquake moment magnitudes on imbricate reverse faults from palaeoseismic data: fox peak and forest creek faults, South Island, New Zealand. *Bull Seismol Soc Am* 106(5):2345–2363
- Tsodoulos, I.M., Stamoulis, K., Caputo, R., Koukouvelas, I., Chatzipetros, A., Pavlides, S., Gallousi, C., Papachristodoulou, C., & Ioannides, K., (2016). Middle–Late Holocene earthquake history of the Gyrtani Fault, Central Greece: Insight from optically stimulated luminescence (OSL) dating and paleoseismology, *Tectonophysics*, 687, 14-27. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2016.08.015>.
- Xiaobo, Z., Daoyang, Y., Yanxiu, S., Xingwang, L., Weipeng, G., & Bo, Z., (2003). The 2003 Ms6.1 Minle Earthquake: An Earthquake in the Minle-Yongchang Reverse Fault-Related Fold Belt in the Hexi Corridor, NW China, *Frontiers in Earth Science*, 9, DOI=10.3389/feart.2021.649268
- Wallinga, J., & Cunningham, A.C., (2014). Luminescence Dating, Uncertainties, and Age Range. In: Rink, W., Thompson, J. (eds) *Encyclopedia of Scientific Dating Methods*. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-007-6326-5_197-1
- Wintle AG, Murray AS (2006). A review of quartz optically stimulated luminescence characteristics and their relevance in single-aliquot regeneration dating protocols. *Radiation measurements* 41 (4): 369-391.
- Yukihara, E. G., & McKeever, S. W., (2011). *Optically stimulated luminescence: fundamentals and applications*. John Wiley & Sons.
- Yüksel, M., (2018). *Termolüminesans Yöntemi ve Dozimetrik Çalışmalar*. Fen Bilimleri ve Matematik Temel Alanı Örnek Araştırmaları Kitabı (pp.171-192), Ankara: Nobel Akademik Yayıncılık.
- Yüksel, M., (2018). Thermoluminescence and dosimetric characteristics study of quartz samples from Seyhan Dam Lake Terraces. *Canadian Journal of Physics*. 96(7): 779-783. <https://doi.org/10.1139/cjp-2017-0741>