

## AKUSTİK EMİSYON (AE) YÖNTEMİNİN BİYOMEDİKAL ALANDA ALTERNATİF BİR METOT OLARAK UYGULANMASI

**Deniz KARADUMAN<sup>1</sup>, Durmuş Ali BİRCAN\*<sup>2</sup>, Ahmet ÇETİN<sup>3</sup>**

1Çukurova Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Adana/Türkiye

2Çukurova Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Adana/ Türkiye

3Adıyaman Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Adıyaman /Türkiye

### ÖZET

Günümüz medikal uygulamalarında özellikle plak ve vida osteosentez cerrahi operasyonları sonrası kırık kemiklerin iyileşmesi; tomografi, Manyetik Rezonans (MR) ve geleneksel X-Ray sonuçları ve hekimin klinik muayenesinin harmanlanması neticesinde sadece görsel olarak tespit edilebilmektedir. Ancak, bu değerlendirmeler bazı durumlarda iyileşen kemiğin mekanik davranışı ve iyileşme sürecinin tam olarak tamamlanıp tamamlanmadığına dair yeterli bilgi sağlayamamaktadır. Ayrıca, iyileşme sürecinin teşhisi hastanın her klinik ziyareti esnasında tekrarlanan kısa aralıklı gözlemler ile doğrulanmaktadır. Bu denli sıklıkta hastanın radyasyona maruz kalması ilik hipoplazisi, kötü huylu tümör ve ileri aşamalarda çok kötü klinik vakalar ile karşılaşılmasına neden olabilmektedir. Bu olumsuz durumlara karşı, Tahribatsız Muayene (TM) yöntemlerinden biri olan Akustik Emisyon (AE) yönteminin çeşitli biyomedikal alanlarında kullanılması son yıllarda yaygınlaşmıştır. Bu çalışmanın amacı, AE tekniğinin faydalarına değinerek kırık iyileşme sürecinin AE TM yöntemi kullanarak gözlemlenmesinde usulleri belirlemek, uygulamak ve sonuçlarını değerlendirmektir.

**Anahtar Kelimeler:** Akustik Emisyon (AE), Tahribatsız Muayene (TM), Biyomekanik, Kırık İyileşmesi

## APPLICATION OF ACOUSTIC EMISSION (AE) METHOD IN BIOMEDICAL AS AN ALTERNATIVE METHOD

### ABSTRACT

Healing of broken bones, especially after plate and screw osteosynthesis surgery operations, can only be evaluated as a result of tomography, Magnetic Resonance (MR) and conventional X-ray and clinical examination of the doctors in today's medical applications. However, in some cases these evaluations do not provide sufficient information on the mechanical behavior of the healed bone and whether the healing process is complete or not. In addition, the diagnosis of the healing process is confirmed by repeated short-term observations during each clinical visit of the patient by doctor. Such frequent exposure to radiation can lead to bone marrow hypoplasia, malignant tumors and very unfortunate clinical cases in future life of the patient. Alternative to traditional methods, the Acoustic Emission (AE), one of the Non-Destructive Inspection (NDT) methods, has been used in recent years for various biomedical applications. The aim of this study is to define procedures and evaluate results in the bone fracture healing process observed using the AE NDT method, referring to the benefits of the AE technique.

**Keywords:** Acoustic Emission (AE), Non-Destructive Testing (NDT), Biomechanics, Fracture Healing

---

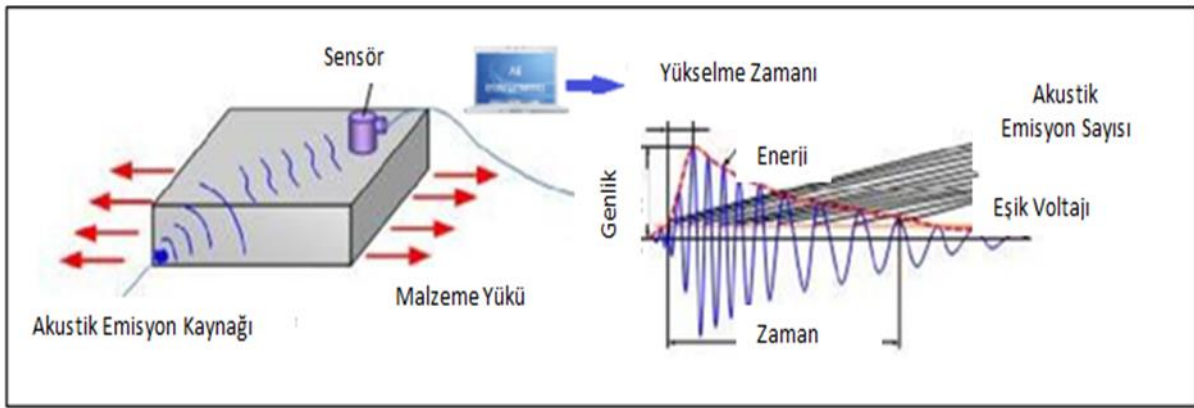
\* e-posta: [abircan@cu.edu.tr](mailto:abircan@cu.edu.tr)

## 1. Giriş

Akustik Emisyon (AE), gerilme altın çalışan malzemelerde bir ya da daha çok yerel kaynağın hızla enerji salarak oluşturduğu geçici elastik dalgalar olarak tanımlanmaktadır. AE; malzeme, yapı, proses açısından çok geniş alanı kapsayan doğal bir olaydır. En büyük çaplı AE sismik olaylar olup, AE muayene yöntemi ile incelenebilen en küçük ölçekli proses ise yük altındaki metallerde meydana gelen dislokasyon hareketidir [1].

AE test yöntemi, yük altındaki malzeme ve bileşenlerindeki yapısal hataları tespit ve mevki tayininde kullanılan bir TM test yöntemidir. AE yöntemi ile yük altındaki malzemede oluşan süreksizlik başlangıcı hakkında ve sürekli veya tekrarlamalı yüke maruz bırakılması ile gelişen bu süreksizlik hakkında geniş kapsamlı bilgi elde edilebilmektedir [2].

AE testi, malzemeden yayılan AE sinyalleri tespit eden araçlar kullanarak kayıt ve analiz tekniklerine dayandırılan bir test yöntemidir. AE kaynağından yayılarak malzemenin yüzeyine ulaşan elastik dalgalar; sinyal gücünün artırılması, işlenmesi ve kaydedilmesi öncesinde sensörler vasıtasıyla tespit edilerek mV mertebesinde elektrik sinyaline dönüştürülmektedir. Elde edilen sinyallerin analizi ve işlenmesi doğrultusunda, malzemede oluşan herhangi bir kusur Şekil 1'de gösterildiği gibi tespit edilmektedir [3].



Şekil 1. AE oluşumu ve algılanması [3].

Bu teknoloji, materyal ve yapısal hataların seslerini dinleyen ultrasonik sensörlerin (20 KHz-1 MHz) kullanılmasını içermektedir. AE frekansları genellikle 150-300 KHz aralığındadır. Hidrojen gevrekleşmesi, yorulma, stres korozyonu, sünme ve kırık/çatlak oluşumu bu teknolojinin yardımıyla tespit ve lokalize edilebilmektedir [2].

Kemiğin yapısı mühendislik alanında kullanılan kompozit malzemeler ile benzerlik göstermektedir. Bu nedenle, kompozit materyallerin testlerinde uygulanabilirliği ve elverişliliği kanıtlanan AE TM yöntemlerinin kemikler üzerinde kullanılması çok avantajlıdır. Kompozit malzemelerdeki mekanik durum ve bu durumlara bağlı olarak gelişen AE karşılığı geçmişte çalışılmıştır [4].

AE sinyallerinin analizi, kırılma yükünün çok öncesinde kemik kırılmaları hakkında ön bilgi elde etmemize imkân sağlamaktadır. Yaş ve kuru kemik örnekleri üzerinde yapılan değerlendirmeler, kırık başlangıcındaki kemiğin mukavemetinin kestirilmesinin mümkün olduğunu ve böylece kemik kırılma ihtimalinin öngörülebileceğini ortaya çıkarmıştır [5].

Plak ve vida osteosentezi ile tedavi edilen kırık vakalarında, iyileşme sürecinin gözlemlenerek vida ve plakların ne zaman çıkarılacağına karar verilmesi çok önemli bir süreçtir. Günümüz

uygulanmasında Radyografi/Tomografi/MR sonuçlarına ve manuel olarak yapılan klinik muayenelerine istinaden kırık kemiklerin iyileşmesinde callus oluşumu gözlemlenmektedir. İyileşme sürecinin sonlandırılıp/sonlandırılmaması konusunda hekim tecrübesi ile subjektif bir kanaate varılmaktadır [6]. Yapılan çalışma ile kemiğin AE yöntemi ile mekanik özellikleri tespit edilerek, ölçülebilir ve objektif bir yaklaşım ile kırık iyileşme sürecinin gözlemlenmesine olanak sağlanacaktır. Literatürdeki benzer çalışmaların çoğunda AE'nin kırık iyileşmesinin değerlendirilmesinde potansiyel bir metot olduğu kanıtlanmıştır. Yapılan çalışmalar genel itibarıyla çıplak kemik üzerinde yapılmış olup, internal fiksasyon yöntemi ile sabitlenmiş bir kemiğin AE muayene yöntemi ile gözlemlenmesi gerçekleştirilmemiştir.

Watanabe ve ark. (2001) bir hayvan modeli kullanarak kemiğin mekanik özelliklerindeki değişimi incelemiştir [7]. Deneysel olarak kırık oluşturulan fare femur kemikleri, iyileşme sürecinin 4., 6., 8. ve 12'nci haftalarında çekme ve burulma testine tabi tutulmuştur. Söz konusu testler esnasında AE sinyalleri gözlemlenmiştir. Aynı çalışma grubu AE test yöntemini harici fiksasyon araçları ile tedavi edilen hastalar üzerinde uygulamışlardır. AE yöntemi ile kemik iyileşmesinin tahmin edilip/edilemeyeceğini tespit etmek amacıyla radyografik değerlendirmeyi ve AE sinyallerini ilişkilendirmeye çalışmışlardır. Çalışmalarında harici fiksator aracı üzerine yerleştirilmiş sensörler vasıtasıyla elde edilen toplam AE darbe sayıları kullanılmıştır [8].

Bu çalışmada; sığır tibia kemik örneğinde oluşturulan yapay kırık, plak ve vida kullanılarak internal fiksator ile sabitlenmiş ve kırık yüzeyleri callus dokuyu simüle etmek amacıyla Polimetilmetakrilat (PMMA) kemik çimentosu ile doldurulmuştur. Kortikal kemik ile PMMA'nın mukavemet özellikleri benzer olduğundan, büyüme davranışını simüle etmede PMMA'nın iyi bir yöntem olduğu düşünülmektedir. Shao ve ark. (2007) da benzer düşünce ile femoral implanta ait in vivo doğal frekans belirleme deneyini gerçekleştirilmiş ve polimerlerin benzetim kabiliyetlerini ortaya koymuştur [9,10].

Özetlenen çalışmalara paralel şekilde, bu çalışmada "in vitro" tekniğe dayandırılarak sığır tibia kemik örneği çekme testine tabi tutulmuş ve AE propagasyonu gözlemlenmiştir. AE olay başlangıcındaki kuvvet değeri mekanik parametre olarak ele alınmıştır. Kuvvet-zaman ve kümülatif AE olay/darbe sayısı-zaman grafikleri karşılaştırılarak çekme testi esnasında AE etkinliği gözlemlenmiş ve test sonuçları ayrıntılı şekilde sunulmuştur.

## 2. Materyal ve Metod

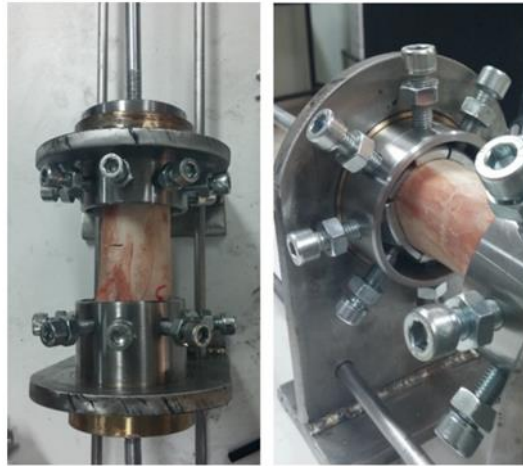
Bu çalışmada, AE oluşumunun başlangıcındaki yük ile kemiğin mekanik özellikleri ilişkilendirilerek, özellikle modellenen callus dokusunun mukavemet değeri irdelenmektedir. Yapılan deney, hayvan modeli kullanılması suretiyle in vitro tekniğe dayanmaktadır. Deneyde; yerel bir kasaptan temin edilen, yaklaşık 250-300 kg. ağırlığındaki sığıra ait tibia (uzunluk:400mm, ağırlık:2kg) kullanılmıştır.

Yumuşak dokudan (kas lifleri, ilik vb.) temizlenen test modeli el testeresi marifetiyle metafiz kısmından kesilmiştir. Böylece, epifiz olarak adlandırılan kemik uç kısımları ayrıştırılmıştır. Daha sonra, test modelinin diyafiz orta noktasında kırığı modelleyecek şekilde 4 mm boşluk oluşturmuş ve iyileşme sürecini simüle edebilmek amacıyla PMMA kemik çimentosu ile doldurulmuştur (Şekil 2). Test modeli, paslanmaz çelikten imal edilmiş (boy:114,5mm, en:16,2mm, kalınlık:5mm) 4 vidalı bir plakla sabitlenmiştir (Şekil 2).



**Şekil 2.** Kemik modelinin hazırlanışı ve montajı.

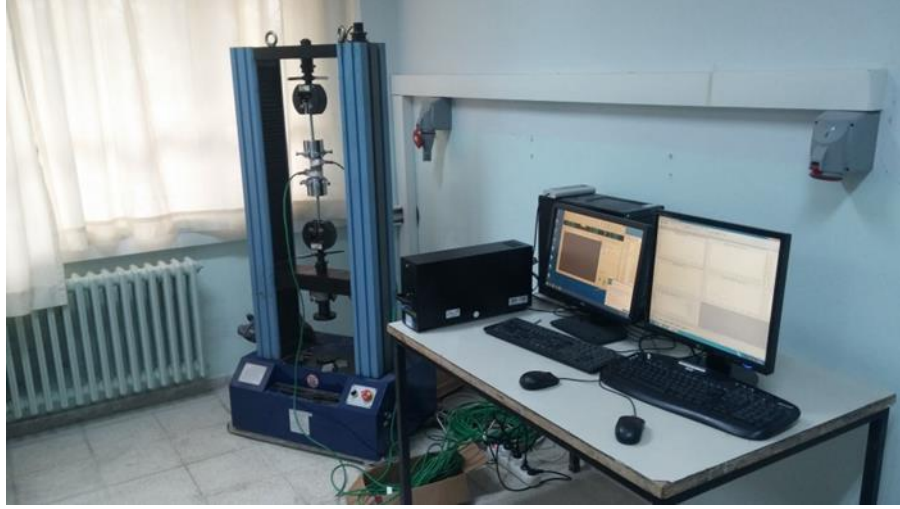
Kemik modelini çekme test cihazına bağlayabilmek için özel aparat ve kemiği sıkıştırarak kaymasını önlemek için özel çene tasarlanıp imal edilmiştir. Ayrıca, test modelinin doğrusal şekilde aparatla sıkıştırılması ve çekme test cihazına bağlanabilmesi için imal edilen yataklama düzeneği ile test modeli sabitlenmiş ve aparatın doğrusallığı sağlanmıştır (Şekil 3). Çekme testi, Çukurova Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü laboratuvarında bulunan 50 kN kapasiteli WDW-50 model Universal elektro-mekanik test cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 4). Test modeli, kırılma gerçekleşinceye kadar 2 mm/dk. deplasman hızında çekme kuvvetine maruz bırakılmıştır (Şekil 4). Yük-zaman, stres-gerilim, yük-deplasman, yük-uzatma ve uzatma-zaman grafikleri kaydedilmiştir. Elde edilen veriler doğrultusunda, çekme mukavemeti (yük sensörü tarafından algılanan maksimum yük) ve AE başlangıç yükü (ilk AE olayının gözlemlendiği yük) mekanik parametreleri elde edilmiştir.



**Şekil 3.** Özel aparat ve yataklama düzeneği.

Mekanik test esnasında, “AEwin for SAMOS” yazılımı ve diğer AE test enstrümanları ile donatılmış “MISTRAS Micro-II Digital AE sistem işlemcisi (32 kanallı)” kullanılarak AE sinyalleri ölçülmüş ve kaydedilmiştir (Şekil 4). Test modelinin uç kısımlarındaki yüzey üzerine iki adet geniş bant piezoelektrik sensör (KRNI150 100kHz-400kHz) yapışkan bant vasıtasıyla monte edilmiştir. Çevre gürültüsünün (mekanik test cihazı vb.) elemine edilmesi için eşik değer 45 dB olarak ve analog filtreleme 20-400 kHz aralığına ayarlanmıştır. Kemiğin materyal özellikleri ile ses iletim

karakteristikleri ve AE zamanlama parametreleri (PDT, HDT ve HLT) işlemciye tanımlanmıştır. Çekme ve AE test düzeneği Şekil 4’de gösterilmiştir.



Şekil 4. Çekme ve AE test düzeneği.

Piezoelektrik sensörlerin kalibrasyonu ASTM E 976 [11] standardına göre kalem kırma yöntemi olarak da bilinen “Hsu-Nielsen” metodu ile gerçekleştirilmiştir. Bu prosedür sensörlerin hassasiyetini tespit etmede büyük önem arz etmekte olup en ufak bir yerleşim hatası, hatalı test sonucu elde etmemize neden olabilmektedir. “Hsu-Nielsen” metodu Şekil 5’te hem görsel olarak gösterilmiştir.

Ölçülen AE parametreleri zaman (s), kümülatif AE olay ve darbe sayısı, genlik (dB), mutlak enerji (ae), enerji (eu) ve tepe frekans (hz) değerleridir. Bu parametrelere göre, zamana bağlı kümülatif AE olay, kümülatif AE darbe, genlik, mutlak enerji, enerji ve tepe frekans eğrileri elde edilmiştir. Bu çalışmada, AE darbe ve olay sayısı değişkenleri ele alınmıştır.



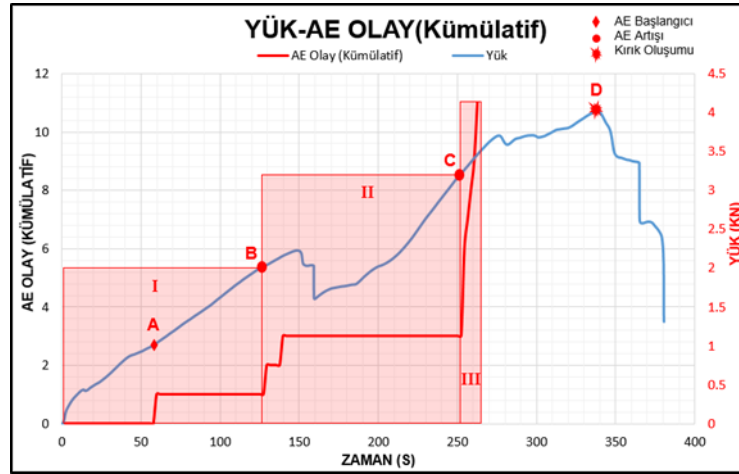
Şekil 5. Hsu-Nielsen metodunun gösterimi.

AE etkinliğinin ayırt edilebilmesi amacıyla, yük-zaman-kümülatif AE olay grafiği 3 bölgeye ayrılmıştır. (1) erken AE safhası; çatlak/kırık propagasyonu emarelerinin olduğu safha, (2) istikrarlı çatlak/kırık propagasyon safhası; düşük oranda AE oluşan safha, (3) istikrarsız çatlak/kırık propagasyon safhası; AE miktar ve oranında büyük artışın gözlemlendiği ve final kırılmanın gerçekleştiği safha [12].

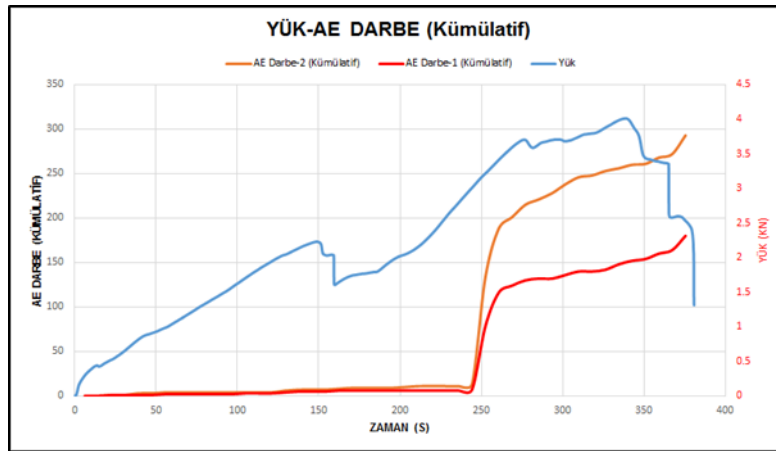
### 3. Bulgular

Yük-zaman ve kümülatif AE olay-zaman grafiklerinin karşılaştırılması ile, test modelinin toplam AE aktivitesi ve kırık/çatlak propagasyonu bu noktada irdelenmiştir (Şekil 6). Yapılan testte, kümülatif AE eğrisinin artan çekme kuvveti ile birlikte hızlı bir artış gösterdiği gözlemlenmiştir. AE olay başlangıç yükü 59,7'nci saniyede 1036 N olarak tespit edilmiştir (A noktası). Toplamda 11 adet AE olay gözlenmiştir. Buna ilave olarak, ilk sensörde 180 adet AE darbe ve ikinci sensörde ise 293 adet AE darbe gözlenmiştir. Final kırılma 339'uncu saniyede (D noktası) yükte hızlı bir düşüşle gerçekleşmiş olup maksimum yük 4012 N olarak kaydedilmiştir. AE olay eğrisindeki her majör değişim (B ve C noktası), AE darbe sayısı değerinde önemli artış göstererek örtüşmüştür.

1'inci bölgede 129,4'üncü saniyeye kadar (2042 N, B noktası), 1 adet AE olay tespit edilmiştir. 2'nci bölgede yükün 2042 N'dan (B noktası) 3264 N'a (254'üncü saniye, C noktası) %59,8 oranında artışı esnasında, gözle görülür bir kırılma olmadan 2 adet AE olayı gözlenmiştir. 3'üncü bölgede ise 262,7'nci saniyeye kadar kayda değer bir artışla 8 adet AE olayı tespit edilmiştir. Kümülatif AE olay grafiğine paralel şekilde, istikrarsız çatlak/kırık propagasyon safhasında (3'üncü bölge) her iki sensör tarafından algılanan AE darbe sayısında da önemli bir artış sergilenmiştir (Şekil 7).



Şekil 6. AE etkinlik bölgeleri ve kümülatif AE olay sayısı ile ilişkilendirilen yük-zaman değişimi.



Şekil 7. Kümülatif AE olay sayısı ile ilişkilendirilen yük-zaman değişimi.

#### 4. Sonuç ve Tartışma

Yapılan çalışmada, kümülatif AE olay ve darbe eğrisinin artan çekme kuvveti ile birlikte hızlı bir artış gösterdiği gözlemlenmiştir. AE olay eğrisindeki her majör değişim AE darbe sayısında önemli artış göstererek örtüşmüştür. Yük-zaman-AE olay grafiği üzerinde AE aktivite bölgelerinin tespiti yapılarak çatlak/kırık propagasyonunun evreleri tayin edilmiştir. Gözle görülür çatlak/kırılma gerçekleşmeden önce AE etkinliği tespit edilerek kırık iyileşme sürecinin gözlemlenebileceği sonucuna varılmıştır.

Gelecek çalışmalarda, iyileşme sürecinin değişik evrelerinde hastaların uzuvlarına yerleştirilen ağırlığın yavaşça kaldırılması istenerek, kemik ve callus dokunun AE başlangıç yükü değişiminin gözlemlenmesi ile hekim tarafından tedavi değerlendirilebilecektir. Ancak, bugüne kadar gerçekleştirilen çoğu çalışma in vitro tekniklere dayandırılmıştır. Klinik uygulamada kullanılacak AE muayene yöntemleri için, canlı hayvan veya gönüllü hastalar üzerinde kapsamlı deneysel çalışmaların yapılması zaruridir [13].

Plak ve vida osteosentezi ile tedavi edilen kırık uzvun durumunun gerçek zamanlı şekilde AE muayenelerinin yapılması muhtemel bir uygulamadır. Kırık uzvun etrafına yerleştirilecek AE sensörlerin vasıtasıyla, hastanın oturma/kalkma, yürüme, merdiven çıkma, zıplama gibi hareketleri yapması istenerek iyileşmenin tamamlanıp/tamamlanmadığı kanaatine varılabilecektir. Eğer hasta bu hareketleri hiçbir AE olayı tespit edilmeden yapabiliyorsa kemik gerçek anlamda mekanik özellikler açısından iyileşmiş demektir. Böylece, hekim internal fiksatorün sökülmesi veya tedavinin devam ettirilmesi yönünde ölçülebilir ve objektif bir yaklaşım ile karar verebilecektir. Ancak bunun için de, insan vücudundaki AE kaynaklarının (kas hareketleri, kan akışı vb.) detaylı şekilde incelenmesi gerekmektedir.

#### Teşekkür

1. Bu çalışma Çukurova Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmektedir (Proje No: FYL 2016-6515).

2. Konu ile ilgili araştırmada imkân sağlayan Tekprom Uygunluk Değerlendirme ve Gözetim Hizm. Ltd.Şti.'ne ve Dursun DÖĞER'e teşekkürü borç biliriz.

#### Kaynaklar

- [1] Tuncel, S., 2008. Tahribatsız Muayene Teknolojilerinde Son Gelişmeler: Akustik Emisyon.3rd International Non-Destructive Testing Symposium and Exhibition, İstanbul Türkiye.
- [2] Hellier C. J., Handbook of Nondestructive Evaluation, vol.70, pp.466-470, 2003.
- [3] Gao L., Zai F., Su F., Wang H., Chen P. and Liu L., 2011. Study and Application of Acoustic Emission Testing in Fault Diagnosis of Low-Speed Heavy-Duty Gears. Sensors (Basel), 11(1), p.599-611.
- [4] Ravi P., 1980. Non-Destructive Testing of Composites. vol.10, p.217-224.
- [5] Franke R.P., Dorner P., Schwlbe H.J. and Ziegler B., 2004. Acoustic Emission Measurement System for the Orthopedic Diagnostics of the Human Femur and Knee Joint. J. Acoustic Emission, 22, p.92-99.
- [6] Claes, L.E., Cunningham, J.L., 2009. Monitoring the Mechanical Properties of Healing Bone. Symposium: Biomechanics of Bone Healing.
- [7] Watanabe, Y., Takai, S., Arai, Y., Yoshino, N., Hirasawa, Y., 2001. Prediction of Mechanical Properties of Healing Fractures Using Acoustic Emission. Journal of Orthopaedic Research, 19, p.548-553.
- [8] Hirasawa Y., Takai S., Kim W.C., Takenaka N., Yoshino N., Watanabe Y., 2002. Biomechanical Monitoring of Healing Bone Based on Acoustic Emission Technology. Clin. Orthop. Relat. Res., 402, p. 236-244.

- [9] Shao, F., Xu, W., Crocombe, A., Ewins, D. 2007. Natural Frequency Analysis of Osseointegration for Transfemoral Implant. *Annals of Biomedical Engineering*, 35(5), p.817-824.
- [10] Ahan, A.O., Bozdağ, E., Sünbuloğlu, E., 2014. Titreşimin Kemik İyileşmesine Etkisinin Belirlenmesi. *Journal of Engineering Sciences and Design*, p.127-134.
- [11] ASTM E976 - 10 (2010). Standard Guide for Determining the Reproducibility of Acoustic Emission Sensor Response, ASTM International, DOI: 10.1520/E0976-10.  
Kohn, D.H., 1995. Acoustic Emission and Nondestructive Evaluations of Biomaterials and Tissues. *Critical Reviews in Biomedical Engineering*, 22(3/4):22-306.
- [12] Vera I, Sáez K, Vidal G. Performance of 14 full-scale sewage treatment plants: comparison between four aerobic technologies regarding effluent quality, sludge production and energy consumption. *Environmental Technology* 2013; 34 (15), 1007–1015.
- [13] Shrivastava, S., Prakash, R., 2009. Assessment of bone condition by acoustic emission technique: A review; Birla Institute of Technology and Science, Pilani, India; *J. Biomedical Science and Engineering*, 2, 144-154.