

RAYLI ULAŞIM SİSTEMLERİNDE OLUŞAN AKUSTİK GÜRÜLTÜ VE RAY PARAMETRELERİ İLİŞKİSİ

Eyüp BİLGİÇ*
Murat AKSULU**

* eyup.bilgic@tubitak.gov.tr

** murat.aksulu@tubitak.gov.tr

TUBITAK Ulusal Metroloji Enstitüsü, Gebze, KOCAELİ
Tel: 262-679 50 00

ÖZET

Raylı sistemlerde ulaşım emniyeti önemlidir. Akustik gürültü, bir konfor parametresi olmasının yanı sıra düzenli kontrollerde izlenen bir parametre olarak ön plana çıkmaktadır. Demiryolu ulaşım araçlarında uyulması gereken şartlar, hafif raylı sistemler için çevresel gürültü sınır değerleri, ülkemizde yürürlükte olan Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliği'nde tanımlıdır. Avrupa'da demiryollarında yapılan çalışmalar göstermiştir ki, demiryolu (yuvarlanma) gürültüsünü tetikleyen ana unsurlardan biri tekerlek ve ray pürüzlülüğüdür [1]. Diğer bir bileşen ise demiryolu ulaşım aracının hızıdır. Ray üzerindeki tekerleğin yuvarlanması ile alakalı olan yüzey profili "akustik pürüzlülük" olarak adlandırılır. Akustik pürüzlülük iki şekilde ölçülmektedir. Birincisi doğrudan ölçüm olup rayın pürüzlülüğünün bir yer değiştirme dönüştürücüsü ile doğrudan ölçümüdür. İkincisi ise dolaylı ölçüm olup ray-tekerlek etkileşimi sonucunda oluşan gürültü ve titreşimin ölçümüdür. Doğrudan pürüzlülük ölçümünün avantajı, filtreleme yoluyla yüzey profil verisinin dalga boylarına göre bileşenlerine ayrılıp titreşim/gürültü oluşumunda etkili olmayan yüzey sapmalarının değerlendirme dışı tutulabilmesidir. Değerlendirmede, Fourier analizi veya dijital filtreler kullanılmaktadır. Temaslı ve temassız ray pürüzlülük ölçüm cihazları mevcuttur. Temaslı cihazlar belirli uç yuvarlaklık yarıçapında iğnelere sahip cihazlardır. Bunlar yer değiştirmeyi, ivmeölçer veya indüktif dönüştürücü aracılığıyla elektriksel sinyallere çevirirler. Temassız ölçüm cihazları ise genellikle optik cihazlardır.

Bu yayında raylı ulaşım sistemlerinin oluşturduğu gürültü, ray yüzeyindeki pürüzlülüğün doğrudan ölçümleri, yönetmelikler ve ilgili uluslararası standartların kapsamı hakkında bilgi sunulmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Raylı sistemler, Akustik gürültü, Ray yüzey pürüzlülüğü, Sayısal filtreleme, Fourier analizi.

ABSTRACT

Safety in transportation by means of railway system is important. Besides acoustic noise is a comfort parameter, it stands out as a monitoring parameter for routine controls. The conditions to be complied for railroad vehicles and environmental noise limits for light weight railway systems are defined in Regulation on Assessment and Management of Environmental Noise. The studies on the European railway have shown that, one of the major factors triggering railroad rolling noise is wheel and rail roughness [1]. The other is the speed of train. The surface roughness of the rail associated with rolling noise is called "acoustic roughness". Acoustic roughness is measured by using two different methods. The first method is direct method which a transducer is applied directly to the rail surface. The second method is indirect method which the noise caused by the wheel-rail interaction. The advantage of the direct measurement is that, surface profile data are separated into components through filtering according to their wavelengths and therefore the surface irregularities not effective on vibration/noise generation can be excluded from the evaluation. Fourier analysis or digital filters are used in such evaluations. Rail roughness measuring devices with contact and non contact are also available. The This type of measuring devices have needles having certain radius. These devices convert vertical displacement to electrical signals by means of accelerometer or inductive transducer. Non contact measuring devices are, in general optical devices.

In this paper, survey on noise generated by railway transportation, direct measurement of railway surface roughness, scope of internal regulations and international standards is presented.

Key Words: Railway systems, Acoustic noise, Rail surface roughness, Digital filtering, Fourier analysis.

1. GİRİŞ

Ses; kulak tarafından algılanabilen, hava, su ya da benzeri bir ortamdaki basınç değişimi olarak verilebilen ve dalgalar halinde yayılan bir enerji şeklidir. Gürültü ise, hoşu gitmeyen istenmeyen, rahatsız edici ses olarak tanımlanabilir [2]. Bu tanımdan da anlaşılacağı üzere gürültü öznel bir tanımlama olup kişinin algılamasına bağlı olarak değişmektedir. Gürültünün ve gürültü limitlerinin ölçülebilir büyüklükler cinsinden tanımlanabilmesi, gürültünün herkes tarafından aynı şekilde algılanmasını sağlamaktadır.

Çevremizdeki ana gürültü kaynaklarını;

1. Endüstriyel gürültü,
2. Karayolu gürültüsü,
3. Havayolu gürültüsü,
4. Denizyolu gürültüsü,

şeklinde gruplandırabiliriz. Yaşadığımız çevredeki gürültü limitleri, gerçekleştirilen faaliyet tiplerine, ve faaliyetlerin yapıldıkları alanlara göre tanımlanmış olması gerekmektedir. Raylı sistemler için bu tanımlama, Çevre ve Orman Bakanlığı Tarafından "Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliği"nde yapılmıştır [3]. Yönetmelikte, raylı sistemler ile ilgili kapsamda çevresel gürültü kriterleri aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

Raylı sistem çevresel gürültü kriterleri

MADDE 19 – (1) *Raylı sistemlerden kaynaklanan gürültü seviyesi ve gürültünün önlenmesine ilişkin kriterler aşağıda belirtilmiştir:*

- a) *Raylı ulaşım sistemlerinden çevreye yayılan gürültü seviyesi $L_{gündüz}$ 65 dBA, $L_{akşam}$ 60 dBA ve L_{gece} 55 dBA sınır değerlerini aşamaz.*
- b) *Hafif raylı sistemlerin yer altından geçtiği kapalı alanlar ile yer üstünden geçtiği alanlarda; bekleme, iniş ve binış platformlarında, istasyonlarda ve havalandırma kanallarında zaman dilimine bağlı olarak oluşabilecek L_{eq} cinsinden çevresel gürültü sınır değerleri Ek-VII'de yer alan Tablo-2'deki değerleri aşamaz.*
- c) *Hafif raylı sistemlerin yer altından geçtiği yerlerde istasyon boş iken 500 Hz'de maksimum çınlama süresi proje hedef değeri için 1,4, kabul değeri için ise 1,6 saniye olur. Kent içi ve dışında hafif raylı ulaşım sisteminin gürültüye hassas alanlardan geçtiği yerlerde gürültü perdeleme teknikleri dikkate alınarak etkin ve uygulanabilir tedbirler alınır.*

$L_{gündüz}$ parametresi saat 07.00'den 19.00'a kadar olmak üzere 12 saat, $L_{akşam}$ parametresi saat 19.00'dan 23.00'e kadar olmak üzere 4 saat ve L_{gece} parametresi saat 23.00'den 07.00'ye kadar olmak üzere 8 saat'lik zaman aralıklarını kapsamaktadır. L_{eq} ise gürültünün, ölçüm süresi ile ilişkilendirilmiş eşdeğer gürültü düzeyi değeridir.

Hafif raylı sistemler için limit değerleri Tablo 1'de verilmiştir. Limitler, istasyonların yer altı ve yer üstü olmaları durumlarına göre iki ana gruba ayrılmıştır. Ayrıca yer altında bulunan istasyonların içerisinde bulunan havalandırma sistemlerine ilişkin gürültü limit değerleri de verilmiştir. Limit değerleri 55 dBA ve 85 dBA arasında değişiklik göstermektedir.

Tablo-1: Hafif Raylı Sistemler İçin Çevresel Gürültü Sınır Değerleri [3]

Yer altı İstasyonları		L_{eq} (dBA)	Yerüstü İstasyonları		L_{eq} (dBA)
Gişeler, merdivenler, koridorlar		55	Platformlar (platform kenarından 1,8 m)	Duran ve kalkan trenler için	70
Platformlar (platform kenarından 1,8 m)	Duran ve kalkan trenler için	80		Geçen Trenler	75
	Geçen Trenler	85		Çalışır durumda bekleyen trenler için	65
	Çalışır durumda bekleyen trenler için	65			
İstasyon içinde Havalandırma sistemi		55			
Caddelerde havalandırma kanalları (9,0 m'de)		55			
İstasyon içinde kapalı hacimlerde bulunan acil havalandırma fanları (22,5 m'de)		80			

2. RAYLI SİSTEMLERDE OLUŞAN GÜRÜLTÜNÜN ÖLÇÜLMESİ

Farklı kişilerce aynı tip makine, cihaz vb. için yapılan ölçüm sonuçlarının birbirleri ile kıyaslanabilmesi, yapılan ölçümlerde uygulanan yöntemle ilgili olup sadece aynı ölçüm yöntemine göre elde edilen sonuçlar birbirleri ile karşılaştırılabilir. Gürültü ölçümleri için kullanılan yöntemler genel olarak incelendiğinde karşımıza farklı standart hazırlama kurum/kuruluşları (ISO, EN, DS, TS vb.) tarafından yayınlamış Standart olarak çıkar.

Raylı sistemlerinde gürültü ölçümleri için standart taraması yapıldığında;

1. DS/EN ISO 3095 Railway applications – Acoustics – Measurement of noise emitted by railbound vehicles [4].
2. DS/EN ISO 3381 Railway applications – Acoustics – Measurement of noise inside railbound vehicles [5].
3. DS/EN 15461+A1 Railway applications – Noise emission – Characterization of the dynamic properties of track sections for pass by noise measurements [6].
4. DS/EN 15610 Railway applications – Noise emission – Rail roughness measurement related to rolling noise generation [7].
5. DS/EN 15892 Railway applications – Noise emission – Measurement of noise inside driver's cabs [8].

Yukarıda verilen standartlar, kapsamaları ve ölçülecek parametreleri incelenmiş ve Tablo 2'de özet olarak sunulmuştur.

Tablo-2: Raylı Sistemlerden Kaynaklanan Gürültünün Ölçümü İle İlgili Standartlar ve Kapsamları

Standart	Kapsam	Ölçülen Büyüklük
<p><u>DS/EN ISO 3095</u></p> <p>Railway applications – Acoustics – Measurement of noise emitted by railbound vehicles.</p> <p><i>Demiryolu uygulamaları – Akustik – Demiryolu araçlarından yayılan gürültünün ölçümü</i></p>	<p>Raylar veya benzer yapı üzerinde tüm araçların:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Tip testleri ve 2. Periyodik izleme testleri için uygulanabilir. <p>Bu testlerin sonuçları</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Trenlerden yayılan gürültüyü karakterize etmek, 2. Belirli bir hat üzerinde çalışan çeşitli araçların gürültülerini kıyaslamak ve 3. Trenler için kaynak verisi toplamak için kullanılabilir. <p>Yapılan ölçümler Mühendislik sınıfında olup ± 2 dB doğruluğa sahiptir.</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Sabit hareketli araçlar için, A-ağırlıklı eşdeğer sürekli ses basınç düzeyi, $L_{pAeq,T}$ 2. Hızlanma veya durma testleri için maksimum AF-ağırlıklı ses basınç düzeyi, $L_{pAFmaks}$ 3. Gerekli durumlarda 31,5 Hz – 8 kHz aralığında 1/3 oktav bant ses basınç düzeyi (SPL) ölçümleri 4. Ray pürüzlülüğünün belirlenmesi (EKA)
<p><u>DS/EN ISO 3381</u></p> <p>Railway applications – Acoustics – Measurement of noise inside railbound vehicles.</p> <p><i>Demiryolu uygulamaları – Akustik – Demiryolu araçlarının içinde gürültü ölçümü</i></p>	<p>Raylar veya benzer yapı üzerinde tüm araçların:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Tip testleri ve 2. Periyodik izleme testleri için uygulanabilir. <p>Bu testlerin sonuçları</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Trenlerin içerisindeki gürültüyü karakterize etmek, 2. Belirli bir hat üzerinde çalışan çeşitli araçların iç gürültülerini kıyaslamak ve 3. Trenler için kaynak verisi toplamak için kullanılabilir. <p>Yapılan ölçümler Mühendislik sınıfında olup ± 2 dB doğruluğa sahiptir.</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Standartta tanımlı $L_{pAeq,T}$, $L_{pAeq,T}$ ve $L_{pAeq,T}$ parametresi 2. Gerekli durumlarda 31,5 Hz – 8 kHz aralığında 1/3 oktav bant SPL ölçümleri 3. Gerekli durumlarda standartta tanımlı $L_{pAeq,1s}$ parametresi 4. Hızlanma veya durma testleri için maksimum AF-ağırlıklı ses basınç düzeyi, $L_{pAFmaks}$ 5. Ray pürüzlülüğünün belirlenmesi (EKA)

Tablo-2: Raylı Sistemlerden Kaynaklanan Gürültünün Ölçümü İle İlgili Standartlar ve Kapsamları (Devam)

Standart	Kapsam	Ölçülen Büyüklük
<p><u>DS/EN 15461+A1</u></p> <p>Railway applications - Noise Emission - Characterization of the dynamic properties of track sections for pass by noise measurements</p> <p><i>Demiryolu uygulamaları – Gürültü Yayınımı – Geçiş gürültü ölçümleri için hat bölümlerinin dinamik karakterizasyonu</i></p>	<p>Bu standartta</p> <ol style="list-style-type: none"> Hattın mekanik frekans tepki fonksiyonu (FRF) için veri toplama, İşitme frekans bölgesi içerisinde hat boyunca titreşim azalma oranını hesaplamak için veri işleme Hesaplanan değerleri limit değerleri ile kıyaslamak için metot tanımlanmaktadır. 	<ol style="list-style-type: none"> İvme ölçümleri yaparak FRF belirlenmesi, <p>Ölçümler</p> <p>“ISO 7626-5 Vibration and shock -- Experimental determination of mechanical mobility -- Part 5: Measurements using impact excitation with an exciter which is not attached to the structure”</p> <p>standardına göre yapılmaktadır.</p>
<p><u>DS/EN 15610</u></p> <p>Railway applications – Noise emission – Rail roughness measurement related to rolling noise generation</p> <p><i>Demiryolu uygulamaları – Gürültü Yayınımı – Yuvarlanma gürültü üretimi ile ilgili ray pürüzlülük ölçümü</i></p>	<p>Bu standart rayın pürüzlülüğünü karakterize etmek için doğrudan ölçüm yöntemi tanımlar.</p>	<ol style="list-style-type: none"> Pürüzlülük, Mesafe
<p><u>DS/EN 15892</u></p> <p>Railway applications – Noise Emission - Measurement of noise inside driver's cabs</p> <p><i>Demiryolu uygulamaları – Gürültü Yayınımı – Sürücü kabinlerinde gürültü ölçümü</i></p>	<p>Bu standart sadece;</p> <ol style="list-style-type: none"> Araç durağan halde iken makinist kabini içerisindeki harici uyarı kornalardan kaynaklanan gürültünün ölçülmesi, Araç hareket halinde iken makinist kabini içerisindeki gürültünün ölçülmesi için uygulanabilir. <p>Yapılan ölçümler Mühendislik sınıfında olup ± 2 dB doğruluğa sahiptir.</p>	<ol style="list-style-type: none"> Sabit hareketli araçlar için, A-ağırlıklı eşdeğer sürekli ses basınç düzeyi, $L_{pAeq,T}$

2.1. Akustik Pürüzlülük

DS/EN 15610 standardında [7], yuvarlanma gürültüsüyle alakalı olan ray pürüzlülüğünün, yani “akustik pürüzlülüğün” 1/3 oktav bant spektrumunda karakterize edilmesi ifade edilmektedir. Bu standartta, ray üzerinde ölçüm konumlarının seçimi, verilerin elde edilmesi, verilerin işlenerek 1/3 oktav bant pürüzlülük spektrumunun tahmin edilmesi, bu tahminlerin akustik pürüzlülük limitleriyle karşılaştırılması ve sonuçların 1/3 oktav bant dalgaboyu spektrumu cinsinden verilen bir üst limite kıyaslanması tanımlanmaktadır.

Ham akustik pürüzlülük profili $r(x)$ olmak üzere akustik pürüzlülük seviyesi L_r , eşitlik (1) ile tanımlanır.

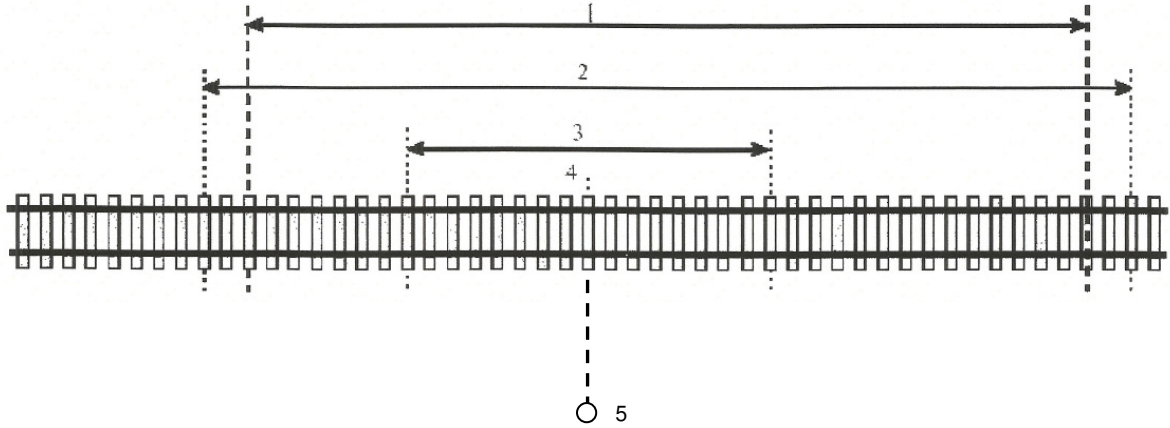
$$L_r = 10 \log \frac{r_{RMS}^2}{r_0^2} \quad (\text{dB}) \quad (1)$$

Burada r_{RMS} : Geometrik ortalama pürüzlülük (μm)
 r_0 : Referans pürüzlülük ($r_0 = 1 \mu\text{m}$)

Dalga boyuna bağlı olarak ifade edilen akustik pürüzlülük genliği $\tilde{r}(\lambda)$ ile gösterilir.

2.2. Pürüzlülüğün Ölçülmesi [4, 5, 7]

Raylı ulaşımda kullanılan araçların oluşturduğu gürültü değeri, raylı aracın hızına, rayın eğrilik yarıçapına ve rayın pürüzlülük değerine bağlıdır. Bu bağlamda gürültü ölçümlerinin veya doğrudan ray yüzey pürüzlülüğünün ölçülmesinin nasıl yapılması gerektiği, ölçüm sırasındaki şartlar vb. referans olarak verilen standartlarda tarif edilmiştir. Şekil 1’de bir hat üzerindeki ölçüm bölgeleri gösterilmektedir.



- 1 Test yapılacak hat,
- 2 Dolaylı pürüzlülük ölçümleri,
- 3 Direkt pürüzlülük ölçümleri,
- 4 Referans bölgesi,
- 5 Mikrofon konumu.

Şekil 1. Ray üzerinde dolaylı ve doğrudan pürüzlülük ölçümleri için hat üzerindeki tanımlamalar.

2.2.1 Temel Kavramlar:

Ray pürüzlülüğü ölçümlerinde kullanılan genel terimlerden önemli olanlar aşağıda verilmiştir.

Buruşma: Ray yuvarlanma yüzeyindeki periyodik aşınma hali, ondüleli görünüm,

Doğrudan pürüzlülük ölçüm metodu: Raydaki akustik pürüzlülüğün, probu doğrudan raya uygulayarak temaslı veya optik ölçümü. Doğal olarak bu metot, tekerlek pürüzlülüğü ve ray-tekerlek etkileşiminden tamamen bağımsızdır.

Dolaylı pürüzlülük ölçüm metodu: Ray-tekerlek etkileşiminin sonucu olarak ortaya çıkan bir büyüklüğü ölçmektir. Gürültü, ray veya aks kutusundaki titreşim vb.

Test bölgesi: Raydaki aşınma izi üzerinde, hep benzer ölçümlerin yapıldığı özel bölge.

Yürüme bandı: Ray üzerinde, ray-tekerlek arasında mümkün olabilecek tüm temas hallerinin gerçekleştiği parlak bölge.

Referans yüzey: Yürüme bandı içinde, akustik pürüzlülük değerlendirmesi için seçilen bölge.

Referans uzunluk: Referans yüzeyin uzunluğu.

Referans genişlik: Referans yüzeyin genişliği w_{ref}

x : Ray uzunluğu yönündeki koordinat,

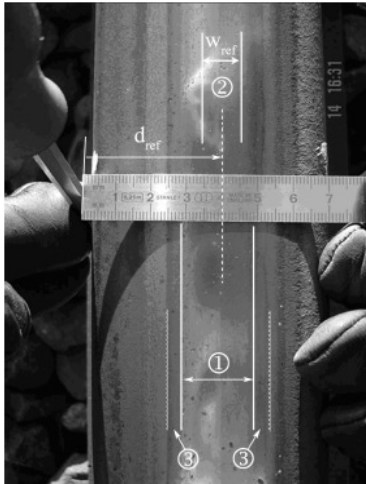
x_i : x koordinatının bir noktası,

z : Verilen bir aralıkta ortalama $r(x)$ yüksekliği,

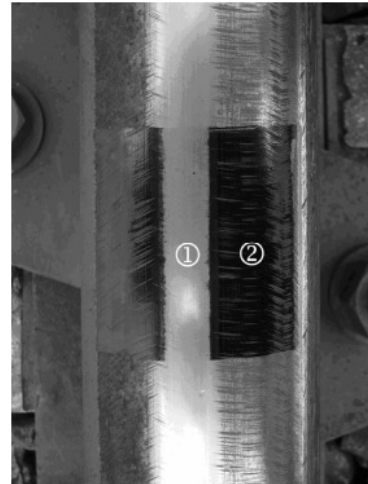
λ : Dalga boyu,

d_{ref} : Referans yüzeyin boyuna simetri ekseninin ray kenarından mesafesi (bakınız Şekil 2).

w_{ref} : Referans yüzeyin genişliği.



Şekil 2. Ray üzerinde ölçüm bölgesi



Şekil 3. Ray yüzeyinin mürekkeple boyanarak yürüme bandının tespit edilmesi

2.2.2 Pürüzlülük Ölçüm Sisteminde Ve Rayda Aranacak Özellikler

Ölçüm sisteminde:

- 1 Ölçümlerin anlamlı olması için L_r ölçülebilir olmalı.
- 2 Temaslı prob kullanılıyorsa ucu küresel olmalı ve yarıçapı 7 mm'yi geçmemelidir. Eğer temassız bir prob kullanılıyorsa, etkin genişliği örneklemeye (numune alma) uzunluğundan az olmalıdır.
- 3 Prob, ray kafası (mantarı) üzerinde ± 1 mm toleransla ray kenarına paralel bir çizgiyi takip etmelidir.
- 4 Örneklemeye uzunluğu: $\Delta x \leq 1$ mm olmalı
- 5 Profilin kaydedilen uzunluğu ≥ 1 m olmalı

Rayda:

- 1 Ölçüm bölgesinde ray homojen olmalı. En azından ray kesiti, eğimi ve ray destekleme elemanları hep aynı olmalı. Dengelenmiş ray hattı söz konusu ise travers tipi, ray keçesi, ray bağlayıcıları, travers aralıkları ve denge ağırlığı her yerde aynı olmalıdır. Eğer seçilen hattın yapısı bir yerden diğerine farklılaşıyorsa başka bir bölge seçilmelidir.
- 2 Rayda bazı istisnai kusurlar olabilir (örneğin ray yanması gibi.). Bunların ses oluşumuna etkisi olmadığından değerlendirmeye alınmamalıdır.

2.2.3 Referans Yüzeyin Seçimi

Ölçüm ekibinin kararına bırakılmıştır. Eğer özel bir demiryolu aracının kabul testleri için pürüzlülük ölçülüyorsa aşağıdaki hususlar dikkate alınmalıdır:

Durum 1: Ray üzerinde yürüme bandı net olarak ayırt ediliyor olmalıdır. Bazen yürüme bandı kenarında 5 mm'den ince bir yarı şartlanmış bölge bulunur. Bu bölge yanlışlıkla değerlendirmeye alınmamalıdır (Şekil 2'de 3 nolu alan).

Durum 2: Hatta birden fazla demiryolu aracı varsa, ilgili demiryolu aracına ait izi bulmak için araç geçmeden önce raya kalıcı mürekkep dökülür (Şekil 3). Araç geçtikten sonra kendisine ait iz açıkça ortaya çıkar. Bu işlemi hattın iki ucunda da yapmak faydalı olacaktır. Test bölgesinin tamamı için geçerli olacak en küçük w_{ref} tespit edilmelidir.

Durum 3: Tekerlek-ray temas konumu, tekerlek ve rayın enlemesine profillerinin geometrisinden tahmin edilebilir. İçi boş tekerleklerin aşınmış olması veya ray kafasının aşınmış olması gibi hallerde temas durumu belirsizdir. Kabul testlerinde böyle durumlarda ölçüm yapılmamalıdır.

2.2.4 Veri Örnekleme

Ray uzunluğu yönünde veri örnekleme işlemlerinde önce ölçülecek profil uzunluğu tespit edilir. Eğer akustik pürüzlülük örnekleme test bölgesi uzunluğunun %80'inden azını kapsıyorsa, her rayda test bölgesinde en az 5 yerde ve en az 1 m uzunlukta örnekleme yapılmalıdır. İlgilenilen frekans bandının genişliği (1/3 oktavda) $\leq 0,25$ m ise 15 m uzunlukta, $\leq 0,1$ m ise 7,2 m uzunlukta örnekleme yapılmalıdır.

Enlemesine veri örneklemede, $w_{ref} \leq 20$ mm ise ray üzerinde bir hat boyunca ölçüm yapılır. $20 < w_{ref} \leq 30$ mm ise ray üzerinde 5 mm arayla 3 hat boyunca ölçüm yapılır. $w_{ref} > 30$ mm ise ray üzerinde 10 mm arayla 3 hat boyunca ölçüm yapılır.

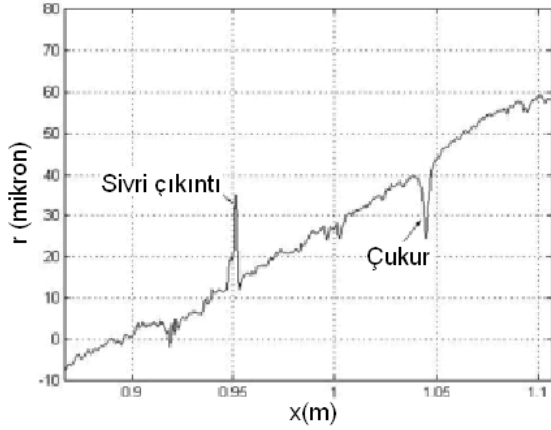
Ray kafası ölçümden önce nem ve diğer pisliklerden temizlenmelidir.

2.3 Verilerin İşlenmesi

- 1 Ray bağlantı yerleri, kusurlar ve kaynak yerleri gibi süreksizlikler ölçüme katılmaz.
- 2 Ham profil verisi dar ve sivri çıkıntılardan temizlenir.
- 3 Ham profil verisi, prob çapının tekerlek çapına göre çok küçük olmasının getirdiği etkiler hesaba katılarak yeniden hesaplanır.
- 4 Her pürüzlülük ölçüm kaydı için 1/3 Oktav bant spektrumu hesaplanır.
- 5 Referans bölge için ortalama pürüzlülük spektrumu tahmini yapılır.

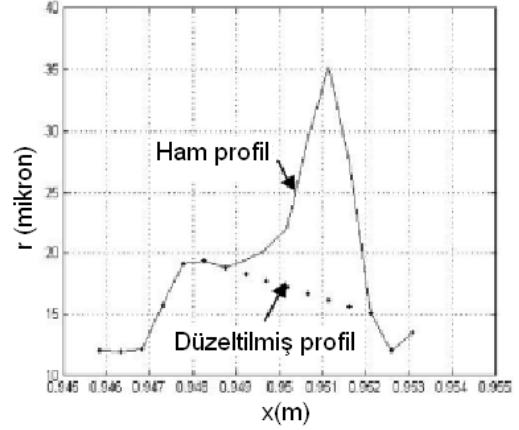
2.3.1 Ham Pürüzlülük Profilinden Küçük Çıkıntıların Temizlenmesi

$r(x)$ ham veri profilinde her nokta için pürüzlülüğün konuma göre 1. ve 2. dereceden türevleri hesaplanır. Ham pürüzlülük profilinde öncelikle tüm yerel ekstrem noktalar tespit edilir, sonra bunların arasından, belirlenen kritere göre dar ve sivri çıkıntılar seçilir ve profilden silinir. Dar ve sivri çıkıntılar profilde kalmayana kadar bu işlem başa dönülerek tekrar edilir. Şekil 4'te sivri tepelerin profilden çıkarılması görülmektedir.



(a)

(a) Ham profil



(b)

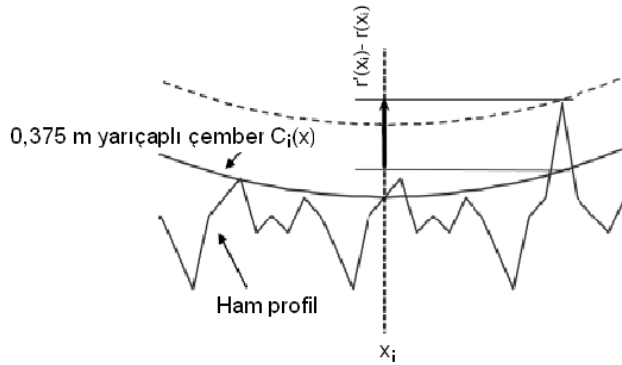
(b) Sivri tepelerin ham profilden çıkarılması

Şekil 4. Ray üzerinde belirlenen pürüzlülük profili ve üzerinde düzeltme yapılması.

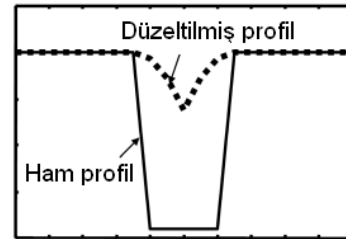
2.3.2 Eğriselliğin İşlenmesi

Rayın ham pürüzlülük profilinde her bir x_i noktası için; merkezi, profilin üst tarafında olan ve x_i noktasından geçen 0,375 m yarıçaplı bir çember çizilir $C_i(x)$. Çemberin en solundan en sağına kadar, profil yüksekliğinin $r(x)$ çember yüksekliğinden $C_i(x)$ farkının büyük değeri, $r(x_i)$ yüksekliğine eklenir. Böylece yeni bir profil elde edilir $r'(x)$. Esas olarak $r'(x)$ profilindeki, tekerlek çapına göre dar ve derin olan çukurlar, derinliği azaltılarak ve yumuşatılarak değerlendirilmeye katılmış olmaktadır. Bu profil, Eşitlik (2) tekerleğin ray üzerindeki gerçek hareket yörüngesi olarak düşünülebilir (Şekil 5).

$$r'(x_i) = \text{Max}(r(x) - C_i(x)) + r(x_i) \quad (2)$$



(a)

Şekil 5. (a) Profilin bir x_i noktasına eğrisellik işleminin uygulanması

(b)

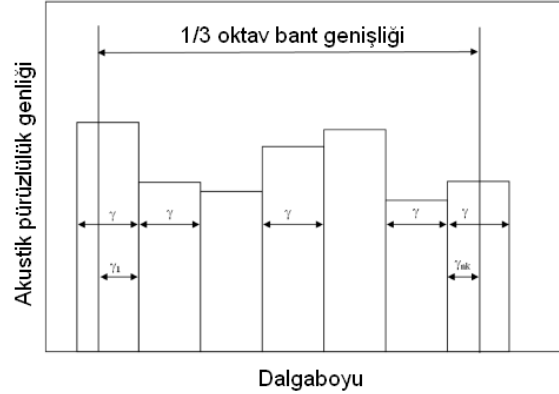
(b) Eğrisellik işleminin derin bir çukur üzerinde etkisi

2.3.3 Spektral Analiz

Sivri tepe ve çukurlardan temizlenmiş olan ham profilin $r'(x)$, 1/3 Oktav bandındaki pürüzlülük spektrumu $\tilde{r}(\lambda)$ iki şekilde elde edilebilir:

Fourier Analizi: Bu metotta öncelikle uzun profillerin parçalara bölünmesi mümkündür. Bu metot uygulandığında profil uzunluğu en az 1 m olmalıdır. Uzun bir profil parçalara bölünmek istendiğinde,

parçalar %50 üst üste binecek şekilde ayrılır. Her parçanın ortalama yüksekliği ve eğimi sıfır olacak şekilde profil koordinatları yeniden hesaplanır. Hesaplamalarda DFT (Discrete Fourier Transform) kullanılır. Her profil parçasının DFT'si, sonuçlar dalga boyu cinsinden elde edilecek şekilde hesaplanır. Her bir parçanın DFT genlik değerlerinin karesinin ortalaması dar bant spektrumu olarak ve dalga boyunun fonksiyonu olarak ifade edilir. 1/3 Oktav bant spektrumu, dar bant spektrumundaki genliklerin, 1/3 oktava ait bant aralığına uygun olarak toplanmasıyla elde edilir (Şekil 6). RMS pürüzlülük parametresi ve akustik pürüzlülük seviyesi L_r hesaplanır.

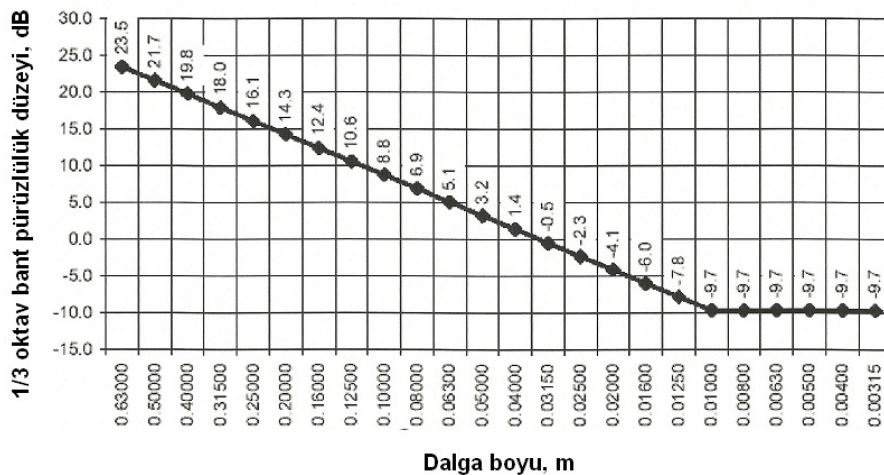


Şekil 6. 1/3 oktav bantlarının hesaplanmasında kullanılan dar bant DFT bileşenleri

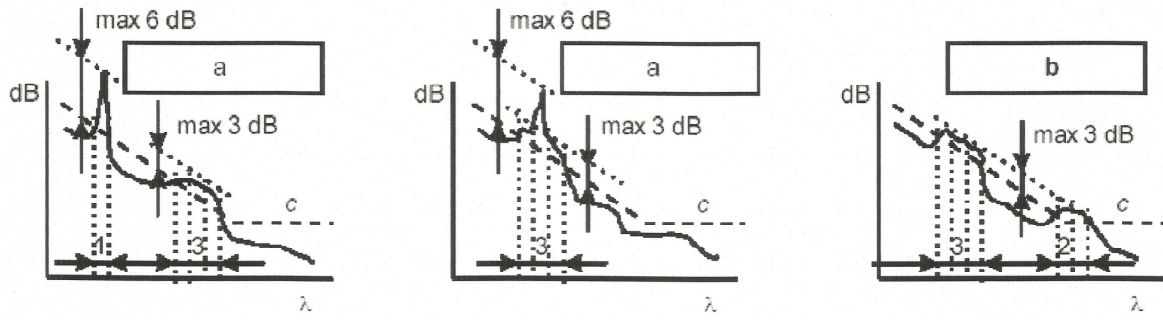
Dijital Filtreleme: EN 61260'a uygun dijital filtre [9] uygulanarak, 1/3 oktav bant değerleri bant geçiren filtre (band-pass) ile hesaplanmaktadır. Filtrelemeyle elde edilen yeni pürüzlülük profilinde RMS parametresi ve akustik pürüzlülük seviyesi L_r hesaplanır.

Bu filtreleme yöntemi kullanıldığında, filtreleme işlemi sonrası profil uçlarından 2 m'lik kısım atılmalıdır. Profil en az 5 m uzunlukta olmalıdır. Dijital filtreleme genellikle çok uzun profillerde tercih edilir.

Ölçülen L_r değerleri Şekil 7'de gösterilen limit değerleri aşmamalıdır. Ancak bu limit değerlerin küçük oranda ve istisnai olarak aşıldığı bazı durumlarda kural yumuşatılmıştır [4]. İstisnai durumlar şöyledir: Dalga boyu 1 cm – 8 cm aralığında olmak şartıyla; tek bir bantta maksimum pürüzlülük seviyesinin limit değeri en fazla 6 dB geçmesine; ardışık en fazla üç bantta ise, maksimum pürüzlülük seviyesinin limit değeri en fazla 3 dB geçmesine izin verilir. Belirtilen dalga boyu aralığında, bu tek bant ve ardışık üç bantlık bölgelerden biri veya ikisi birden bulunabilir. Ancak bu bölgelerden herhangi birinin ikinci defa tekrar etmesine izin verilmez (Şekil 8).



Şekil 7. Ray pürüzlülüğü limit spektrumu [5].



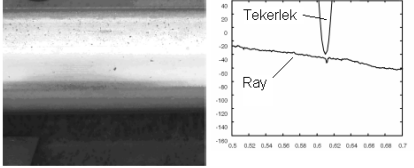
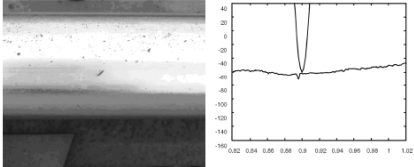
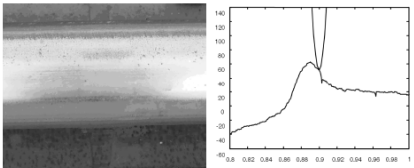
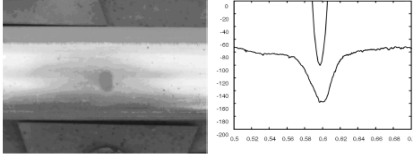
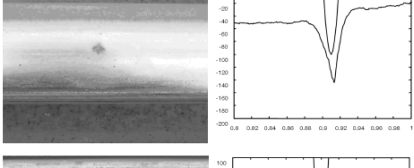
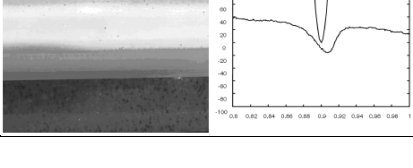
a- Kabul, b- Ret, c- Limit değer

Şekil 8. Ray pürüzlülüğü kabul kriterinin istisnai haller için uygulama örnekleri [5].

2.4 Ray Kusurlarının Akustik Pürüzlülük Ölçümüne Dahil Edilip Edilmemesi

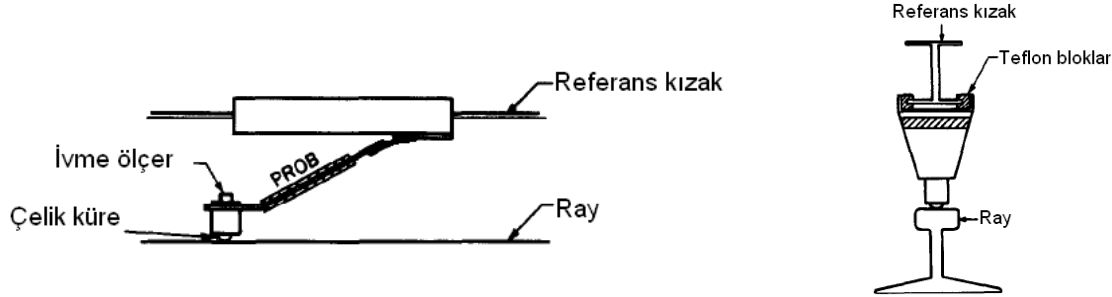
Tablo 3'te EN 15610'a göre akustik pürüzlülük ölçümüne alınması uygun olan ve uygun olmayan sapmalar görülmektedir.

Tablo-3: Akustik pürüzlülük ölçümüne dahil edilmesi uygun olan ve olmayan ray kusurları [7]

Tekerlek yarıçapına kıyasla küçük boyutta çukur. Dahil edilmeli	
Tekerlek yarıçapına kıyasla küçük boyutta çentik. Dahil edilmeli	
Tekerlek yarıçapına kıyasla büyük boyutta kaynak yeri. Dahil edilmemeli	
Travers bağlantı yeri kusuru Tekerlek yarıçapına kıyasla büyük boyutta. Dahil edilmemeli	
Derin çukur 1 Tekerlek yarıçapına kıyasla büyük. (Tekerlek çukurun dibine değmediğinden açıkça görülüyor) Dahil edilmemeli	
Derin çukur 2 Tekerlek yarıçapına kıyasla büyük. (Tekerlek çukurun dibine değdiğinden kolayca görülemiyor) Dahil edilmemeli	

3. DOĞRUDAN PÜRÜZLÜLÜK ÖLÇÜMÜ YAPAN CİHAZLAR

Demiryolu pürüzlülük ölçüm cihazları çok büyük oranda temaslı ölçüm cihazlarından oluşmaktadır [10]. Temaslı pürüzlülük ölçüm cihazlarında düşey yer değişimi, ya bir ivmeölçer yardımıyla veya yer değişimi dönüştürücüsü ile elektrik sinyallerine çevrilmektedir (Şekil.9). Geçmişte daha çok ivmeölçerli cihazlar kullanılmıştır [11]. Günümüzde ise genellikle indüktif yer değişimi dönüştürücüsü içeren cihazlar yaygındır. İvmeölçerli sistemler ray üzerinden sabit bir hızla geçirilmektedir. Bu sistemlerin düşük ölçüm hızlarında hataları yüksektir. Yer değişimi dönüştürücüsü içeren cihazları ise yüksek frekanslara hassastırlar ve bu sebeple yüksek ölçüm hızlarında cihazın fon gürültüsü fazladır.

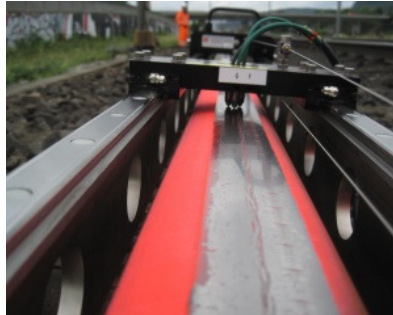


Şekil 9. İvmeölçerli ray pürüzlülük ölçüm cihazı

Yer değişimi dönüştürücüsü içeren cihazlara örnekler Şekil 10 ve 11'de verilmiştir. Şekil 10'daki ölçüm cihazı, referans doğru olarak 1,2 m uzunlukta bir düz kenar kullanılmaktadır. Ray yüzeyinin düz kenara göre düşey mesafesindeki değişim yer değişimi dönüştürücüsü ile temaslı olarak ölçülmektedir. Düşey çözünürlük $1 \mu\text{m}$ 'nin altındadır. Yatay çözünürlük ise 0,5 mm'dir. Ölçüm sisteminin gürültüsü 1/3 oktavda yaklaşık -20 dB (re = $1 \mu\text{m}$)'dir. Cihazın eski modeli bir geçişte bir çizgi boyunca ölçüm yapabilirken, yeni bir modeli eşit aralıklı birkaç çizgi boyunca ölçüm yapabilmektedir.

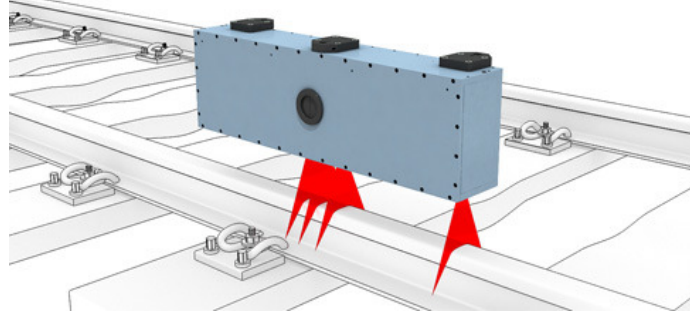


Şekil.10 Temaslı ray pürüzlülük ölçüm cihazı, Ölçüm hattını belli etmek için lazer pointer kullanılmaktadır [12].



Şekil.11 Diğer bir temaslı ray pürüzlülük ölçüm cihazı. [13]

Temassız pürüzlülük ölçümü için üretilmiş bir optik cihaz Şekil.12'de görülmektedir. Ray yüzeyindeki düşey yer değişimi, kameralar ve lazer ile ölçülmektedir. Tasarlama safhasında olan diğer bir temassız pürüzlülük ölçüm cihazı ise "interferometrik ray pürüzlülük ölçüm cihazı"dır [15]. Bilgilere atıf yapılan referanslardan ulaşılabilir.



Şekil.12 Temassız ray pürüzlülük ölçümü [14]

SONUÇ

Bu çalışmada ray üzerinde hareket eden sistemlerin oluşturduğu gürültünün belirlenmesi için gerekli olan parametreler, bu parametrelerle ilgili tanımlar, standartlar ve yönetmelikler incelenmiştir. Ray ve tekerlek arasındaki temas nedeni ile oluşan gürültüye neden olan parametrelerden birisi de ray pürüzlülüğüdür. Pürüzlülük ölçümleri ile ilgili yöntemler, ölçüm cihazları, değerlendirmeler ve gürültü limitleri verilmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] CORDIER, J.F., FODIMAN, P., "Experimental Characterization of Wheel and Rail Surface Roughness", Journal of Sound and Vibration, 231(3), S:667-672, 2000.
- [2] ÖZGÜVEN, N., "Endüstriyel Gürültü Kontrolü", TMMOB Makina Mühendisleri Odası Yayın No:118, 1986.
- [3] "Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliği", Resmi Gazete No:27601, 4 Haziran 2010.
- [4] DS/EN ISO 3095 Railway applications – Acoustics – Measurement of noise emitted by railbound vehicles.
- [5] DS/EN ISO 3381 Railway applications – Acoustics – Measurement of noise inside railbound vehicles.
- [6] DS/EN 15461+A1 Railway applications – Noise emission – Characterization of the dynamic properties of track sections for pass by noise measurements.
- [7] DS/EN 15610 Railway applications – Noise emission – Rail roughness measurement related to rolling noise generation.
- [8] DS/EN 15892 Railway applications – Noise emission – Measurement of noise inside driver's cabs.
- [9] EN 61260 Electroacoustics – Octave band and fractional octave band filters.
- [10] Thompson D.J. "On the relation between Wheel and rail surface roughness and Rolling noise", Journal of Sound and Vibration, 193(1), S:149-160, 1996.
- [11] Galaitsisa A. G., Bende K. "Wheel/Rail Noise-Part V: Measurement of wheel and rail roughness", Journal of Sound and Vibration, 46(3), S:437-451, 1976.
- [12] Diehl R.J., Holm P., "Roughness measurements – Have the necessities changed?", Journal of Sound and Vibration, 293, S:777-783, 2006.
- [13] <http://www.prose.ch/en/2/testing-trials/track-measurement-roughness-measurements-and-vibration-decay-rates>
- [14] <http://www.mermec.it/diagnostic-solutions/track-measurement/61/1/rail-corrugation.php>
- [15] Fidecaro F., Licitra G., Bertolini A., Maccioni E., Paviotti M., "Interferometric rail roughness measurement at train operational speed, Journal of Sound and Vibration, 293, S:856-864, 2006.

ÖZGEÇMİŞ

Eyüp BİLGİÇ

1966 yılı Polatlı Ankara doğumludur. 1988 yılında Ankara Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Mühendisliği Bölümünü bitirmiştir. 1993 yılında Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde Yüksek Lisans eğitimini tamamladı. 2004 yılında Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Fen Bilimleri Enstitüsünden Doktor ünvanını almıştır. 1991 yılında TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü (UME) Akustik Laboratuvarında göreve başlamış olup halen Akustik Laboratuvarları Sorumlusu ve Mekanik Grubu Kalite Yönetim Temsilcisi görevlerini yapmaktadır. Ayrıca TÜRKAK Laboratuvar akreditasyonu denetimlerinde Teknik Uzman olarak görev almaktadır.

Murat AKSULU

1969 yılı İstanbul doğumludur. 1990 yılında İTÜ Makina Mühendisliğini bitirmiştir. Aynı üniversiteden 1993 yılında Yüksek Mühendis, 2008 yılında Doktor ünvanını almıştır. 1996 yılından beri TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü Boyutsal Ölçümler Laboratuvarlarında görev yapmaktadır. Yüzey pürüzlülüğü ve form ölçümleri konularında çalışmaktadır.