

YERALTI METRO İSTASYONLARINDA AKUSTİK TASARIM VE ANALİZ YÖNTEMLERİ

Işın Meriç Nursal¹, Merve Eşmebaşı², Ege Erdem³, Zühre Sü Gül⁴

¹Mezzo Stüdyo Ltd, Ankara, Türkiye
Tel: 312 210 18 25, e-posta: isin@mezzostudyo.com
²e-posta: merve@mezzostudyo.com
³e-posta: ege@mezzostudyo.com
⁴Bilkent Üniversitesi, Ankara, Türkiye
Tel: 312 290 18 17, e-posta: zuhre@bilkent.edu.tr

ÖZET

Son yıllarda Türkiye’de birçok yeni kent içi raylı toplu taşıma sistemleri işletmeye açılmış veya proje aşamasındadır. İstasyon içerisindeki işitsel konfor koşulları ülkemizde geçtiğimiz 15 yılda geliştirilen yasal düzenlemelerle kontrol edilmektedir. Akustik tasarımda yolcu dolaşım alanlarında çınlama, anons sistemlerinin anlaşılabilirliği, raylı sistem araçlarının istasyonlara girerken ve bekleme yapmadan geçerken oluşturduğu gürültü ile havalandırma sistemlerinden kaynaklanan gürültü yer altı istasyonları için incelenen başlıca maddelerdir. İlgili akademik çalışmalarda orantısız ince uzun mekanlarda sesin yayılımı, mimari öğelerin akustiğe etkisi, yüzey malzemelerinin akustik özellikleri ve yerleşimi konu edilmektedir. Bu bildiride, ülkemizde akustik tasarım çalışmaları kapsamında incelenen farklı mimarideki istasyonlarda karşılaşılan akustik sorunlar ve çözümleri üzerine durulacak, ülkemizde akustik çalışmalar kapsamında ele alınan istasyonlardan birinde yapılan incelemeler örnek olarak sunulacaktır.

Anahtar Kelimeler: Raylı toplu taşıma sistemi, metro istasyonu, gürültü kontrolü, çınlama

ACOUSTIC DESIGN AND ANALYSIS METHOD OF UNDERGROUND SUBWAY STATIONS

ABSTRACT

In recent years, many new mass transit rail systems have started to operate or planned in Turkey. The legislative regulations are developed in the last 15 years to control the acoustical comfort conditions within the stations. Reverberation in passenger circulation areas, the intelligibility of public announcement systems, the noise due to trains passing or stopping and the noise of ventilation systems are the main concerns in the acoustical design. The relevant studies in academic literature deals with the propagation of sound in long enclosures, effects of architectural elements specific to stations on acoustics, acoustical characteristics of surface materials and their location in stations. In this paper, acoustical problems and solutions in architecturally different types of stations are discussed and the acoustical examination of a station from Turkey is presented.

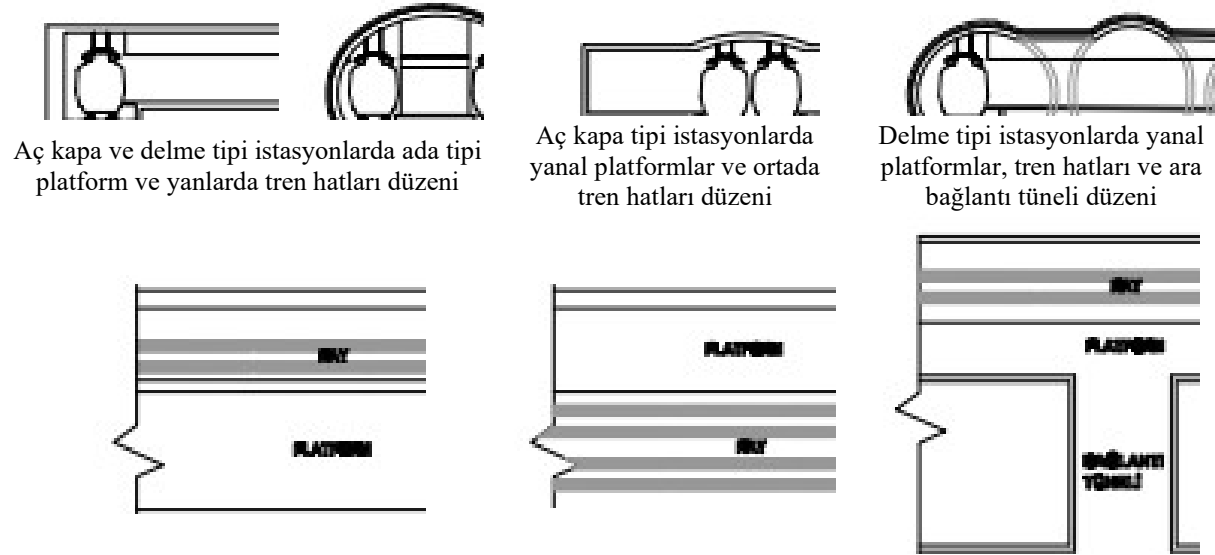
Keywords: Mass transit rail system, train station, noise control, reverberation

1. GİRİŞ

Şehir içi toplu taşıma sistemlerinden raylı sistemler, zaman içinde gelişen ulaşım ağları sayesinde, insanlar tarafından sıklıkla tercih edilir bir duruma gelmiştir. Karayolu trafiğine alternatif olarak tahmin edilebilir süreler içinde ulaşım imkânı sunan raylı toplu taşıma sistemleri, şehir içinde üstlendiği rol sebebiyle büyük önem taşımaktadır. Çalışma prensibi, yolcu taşıma kapasitesi ve seyir hızlarına göre şekillenen raylı toplu taşıma sistemlerinin ülkemizde en yaygın olanlarından bir tanesi metrolardır. Bu gibi sistemlerin seyir halinde çevreye yaydığı gürültünün yanı sıra, istasyon yapıları içerisindeki işitsel konfor koşulları literatürde sıkça işlenen bir konudur. Bildiri kapsamında; istasyon tipolojisi ve kullanılan malzemelere yönelik tanımlamalar, yasal düzenlemelerde istasyon akustiği, istasyon akustiğine yönelik geliştirilen teorik yaklaşımlar ve kullanılan metotlar ile literatürde yer alan araştırmaların sonuçlarından bahsedilerek, ülkemizde istasyon yapıları akustik incelemesine dair yapılan kontroller bir örnek üzerinden anlatılacaktır

1.1. İstasyon tipolojisi ve kullanılan malzemelere yönelik tanımlamalar

Metro istasyonları hemzemin, viyadük veya yer altında tünel olarak inşa edilebilirler. Yer altındaki metro hatlarında istasyonlar aç kapa veya delme yöntemi ile yapılmaktadır. Bu yöntemlerden aç kapa türü inşaa edilenlerde peron kesiti dikdörtgen şeklinde, delme yöntemle inşaa edilenlerde ise dairesel formda olmaktadır [1]. Yolcuların trenleri beklediği ve iniş-binişlerin olduğu platformlar, istasyon yapım yöntemine göre yanal veya ada tipi olarak ikiye ayrılmaktadır. Yaygın görülen istasyon kesitleri ve platform konumları Şekil 1’de verilmektedir.



Şekil 1. Tip istasyon kesitleri ve planları

Çeşitli standartlar ve tasarım ölçütü kılavuzlarında istasyon içinde kullanılacak malzemelerin yangına, aşınmaya, çizilmeye, darbeye, suya, neme ve kaymaya karşı dayanıklı olması, bakım onarım masraflarının düşük olması, yenileme kolaylığı gibi özelliklerinin olması istenmektedir [2, 3, 4]. Bu gibi gereksinimler dolayısıyla, kullanılan malzemeler genel olarak sert yüzeyli, ses yansıtıcı özellikte olmaktadır. Ses yutucu malzeme uygulamaları istasyon mimarisinin el verdiği konumlarda yapılabilmektedir.

1.2. Yasal düzenlemelerde istasyon akustiği

Ülkelerde yasal düzenlemeler çerçevesinde raylı sistemlerden kaynaklanan gürültünün kontrolüne yönelik limitler bulunmaktadır [5]. Türkiye’de özellikle hafif raylı sistem ve metroları ele alan düzenlemeler Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliği’nde (ÇGDYY) yer almaktadır [6]. Yönetmeliğe göre yer altı ve yer üstü istasyonlar için çevresel gürültü sınır değerleri Tablo 1’de sunulmaktadır. Yönetmelikte, istasyon boşken 500 Hz’de maksimum çınlama süresi proje hedef değeri 1,4 saniye, kabul değeri ise 1,6 saniye olarak belirtilmiştir.

Tablo 1. Hafif raylı sistemler için çevresel gürültü sınır değerleri

Yeraltı İstasyonları		L _{eq} (dBA)	Yerüstü İstasyonları		L _{eq} (dBA)
Gişeler, merdivenler, koridorlar		55	Platformlar (platform kenarından 1,8m)	Duran ve kalkan trenler için	70
Platformlar (platform kenarından 1,8m)	Duran ve kalkan trenler için	80		Geçen trenler	75
	Geçen trenler	85			
	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		Çalışır durumda bekleyen trenler için	65

Ayrıca raylı taşıma sistemleri yer altı ve yer üstü istasyon tesisleri tasarım kurallarını içeren TS 12186 ve TS 12127 Türk standartlarında istasyon akustiğine yönelik sınır değerlere yer verilmektedir [2, 3]. Fakat standartlarda tanımlama ve verilen bilgilerde tutarsızlıklar bulunmaktadır.

2. LİTERATÜR TARAMASI

2.1. Uzun yapıların akustik analizlerinde kuramsal kestirim metotları

Metro istasyonları klasik hacimlerden farklı olarak plan düzleminde uzunlukları (boy) genişliklerine (en) oranla çok daha fazla ve akustik literatüründe orantısız hacimler olarak adlandırılan uzun yapılarıdır. Her iki boyutu da çoğunlukla incelenen dalga boylarından yeterince büyüktür. Bu özel oranları sebebiyle çınlama süreleri standart dağınık ses alanına sahip hacimlerden farklı olarak kaynak konumu, hatta kaynak adedi ve kaynaktan alıcının mesafesine bağlı olarak farklılık gösterir. Bu dağınık olmayan ses alanları sebebiyle istatistiksel teori metro istasyonu analizlerinde geçerliliğini kaybeder. İstatistiksel teorinin geçersiz olduğu bir başka durum doğrudan sesin etki alanında olmayan gölge alanlar, örneğin metrolarda sıklıkla bulunan ara bağlantı tünelleridir [7]. Metro istasyonları ve benzeri uzun yapılar üzerine teorik çalışmalara ilginin birincil sebebi budur.

Yıllardır araştırmalara konu olan uzun yapılar üzerine pek çok farklı teori formüle edilmiştir. Her modelin farklı avantajları veya kısıtlamaları vardır. İlk çalışmalardan biri olarak Davies [8] dalga teorisini uzun dikdörtgen kesitlerde ses sönümlemesini tahmin etmek üzere kullanmıştır. Sonuçlar gerçek sönümlemeyi daha düşük tahmin ettiğini göstermiştir. Dalga denklemi ile yapılan varsayımlar sınırlı düşük frekans aralığı için geçerlidir ve gerçek uygulamalara konu olan basitleştirilmiş dikdörtgen koridorlara kıyasla komplike metro istasyonlarının benzetimlerinde yetersiz kalır. Kanal teorisi üzerinden türetilen denklemler [9]

ise dalga boyu-mekân boyutu oranındaki farklılık sebebiyle metro istasyonları gibi mimari yapılarda uygulanabilir değildir.

Kang'ın ilk çalışmalarında ifade ettiği üzere metro istasyonlarında stratejik akustik müdahalelerin etkisi teorik formüllerle değil en doğru ölçekli modellerle test edilebilir [7]. Fakat günümüzde ölçekli modellerin tasarımları test etmede kullanımı bütçe ve zaman kısıtlamaları sebebiyle pratik veya ekonomik değildir. Eski bir tasarım aracı olan ölçekli modeller son yıllarda yerini geometrik akustik yazılımlara bırakmıştır. Bu bağlamda, kaynak imge/görüntüsü ve ışın izleme yaklaşımları hem teorik çalışmalarda hem de pratik uygulamalarda sıklıkla kullanılan yöntemler arasına girmiştir. Kang sonraki çalışmalarında [10] kaynak imge/görüntü izleme tekniğini basitleştirilmiş dikdörtgen kesitli uzun yapıların akustik analizlerinde kullanmıştır. Ayrıca, teorik benzetimlerle elde edilen sonuçları ölçekli model veya saha ölçümlerinden elde edilen sonuçlara göre düzelten ampirik bir veri tabanı modeli geliştirmiştir [11]. Çalışmasında bu yöntemle ses düzeyi (SPL) değerlerinin sistematik olarak uzunluk boyunca gerçek ölçümlerden daha düşük tahmin edildiği/hesaplandığı belirtilmektedir. Kang'ın çalışmalarının en önemli çıktılarından biri uzun yapılarda kaynak-alıcı mesafesi arttıkça çınlama süresinin hızlı bir şekilde en üst düzeye çıkıp sonra yeniden yavaşça düşmesidir. Ayrıca araştırmalarda imge izleme tekniği ile hesaplanan erken sönümleme süresi (EDT) değerlerinin özellikle uzun kaynak-alıcı konfigürasyonlarında çınlama süresinden de fazla farklılığa yol açtığı ortaya konmuştur. Bu sonuç imge izleme tekniğinde dağınık/saçılmış yansımaların dikkate alınmaması ile ilişkilendirilmiştir. Bu tartışmalar uzun yapılarda ses sönümlemesi ile ilgili daha pratik ve gerçeğe yakın sonuç veren metodların gerekliliğini vurgulamaktadır.

Işın izleme modeli yöntemi ise imge izlemeye göre daha esnek dolayısıyla kompleks geometrileri modellemeye daha uygundur. Işın izleme yönteminin avantajı imge izlemeden farklı olarak hem dik açılı yansımaları (speküler) hem de dağınık yansımaları belirli yayılım varsayımları üzerinden dikkate alabilmesidir. Işın izleme yönteminin uzun yapılarda uygulamasını geliştirmek amacıyla Yang ve Shield [12] ışın sayısını optimize etmek üzere yeni bir model geliştirilmiştir. Çınlama süresi kuyruğu-kompensasyon yöntemine dayanan çalışmanın ana hedefi hacmin uzunluğu boyunca yeterli yansıma yoğunluğunu sağlarken geç yansıma miktarını optimum seviyede tutarak bilgisayar destekli çözümlenelerde süreleri en aza indirebilmektir. Fakat bugünün bilgisayar teknolojisinde veri işleme hızlarına bağlı olarak çok daha kısa sürelerde sonuç alınabildiği için, artık erken/geç yansımalara destek verecek ışınların sayısı benzetimlerde önemli bir sorun olmaktan çıkmıştır. Işın izleme yönteminde özellikle bağlantılı hacimlerde (ara tünel benzeri) bazı önemli yansıma patikaları konfigürasyona göre gözden kaçabilir. Ayrıca belirli yüzeylerde yüksek ses yutumu (örnek olarak metrolarda tavan yüzeyleri) kaynak alıcı mesafesi arttıkça ses düzeylerinde fazla tahmine yol açmaktadır. Bu spesifik problem Redmore'un dikdörtgen koridorlar üzerine yürüttüğü çalışmada da vurgulanmıştır [13]. Çalışmanın sonuçlarına göre sınır koşulların çok yutucu olduğu durumlarda difüzyon ve açığa bağımlı ses yutumunun hariç tutulması sonuçlarda fazlasıyla sapmaya ve ses düzeylerinde fazla tahmine yol açmaktadır. Bir diğer değişle, geometrik yansıma varsayımı uygulanamaz hale gelmektedir. Bunun bir sebebi ilk ışın-izleme modellerinde henüz dağınık yansımaları dahil edecek düzeyde yazılımların olgunlaştırılmamış/geliştirilmemiş olmasıdır. Işın-izleme tekniğinin basitleştirilmiş hali olarak adlandırılabilir parçacık izleme algoritmaları [14] ise özellikle metro istasyonları gibi tekli düz koridorlara göre daha karmaşık yapılar olan metro istasyonlarında uygulanabilirliği için çok sayıda parçacık emisyonu gerektirir. Bu ise gerçekçi sonuçlar vermek üzere modelin gereğinden fazla basitleştirilmesine veya çözümlenme sürelerinin pratikte uygulanamayacak sürelerle uzatılmasına sebep olur.

Oda/hacim akustiğinde teorik geçerliliğinin kanıtlanması ardından uygulamaları yaygınlaşan en son ve yenilikçi yöntemlerden biri de difüzyon kestirimi, diğer bir deyişle difüzyon denklem modelidir. Difüzyon denklemi temel olarak ışınımsal (radiative) transfer denkleminin bir basitleştirmesidir. Sonuçlar basit geometriler için analitik yöntemlerle elde edilebileceği gibi kompleks yapılar için numerik çözümleri mümkündür. Model fonon adı verilen ses parçacıklarının sabit enerjiyle (veya atmosferik sönümle etkisi sonrası) düz bir çizgi üzerinde yayılımını takiben sınır koşullarda hacmi çevreleyen duvarlarda saçıcı objelere çarpması sonrası sınır koşulların ses yutma özelliklerine bağlı olarak enerjilerini kaybetmeleri ve yayılıma devam etmeleri prensibinden ilk olarak yola çıkar. Difüzyon denkleminin en önemli avantajları ışın-izlemeye göre çok daha yüksek çözümüleme süreleri ile ses enerjisi akış eğrileri ve vektörlerinin elde edilebilmesidir [15]. Ollendorff [16] gürültü düzeylerini hesaplamak üzere dikdörtgen kesitli trafik tünellerinde ilk olarak fononların difüzyonunu dikkate alan kısmı diferansiyel denklemi geliştirmiştir. Yöntem geliştirildiği zaman pratik uygulamalara adapte edilemeyecek kadar karmaşık kalsa da sonraki çalışmalara önemli bir motivasyon kaynağı olmuştur. Kuttruff [17] uzun dikdörtgen odalarda çınlama süresini hesaplamak üzere integral denklemin yaklaşık çözümlerini kullanmıştır. Bu varsayıma göre, difüzyon/saçınım sağlayan sınır koşullarının geometrik olarak tamamen yansıtıcı sınırlara kıyasla odanın uzunluğu boyunca daha yüksek ses enerjisi sönümlemesi sağladığı kanıtlanmıştır. Picaut et al. [18] difüzyon denkleminin hacim akustiğinde uygulamaları üzerine teoriyi geliştirmiş ve koridorlarda ses sönümlemesi ve çınlama süresi tahminleri için oda kesiti çevresi ve kesit alanlarına bağlı olarak basit ilişkiler türetmiştir. Difüzyon denklemi modelinin (DEM) hem genel oda akustiğinde hem de uzun yapılarda kullanımına yönelik bir sonraki geliştirmesi Valeau et al. [19] tarafından yürütülmüştür. Bu çalışmada çınlama süreleri ve EDT, DEM ve ışın-izleme kıyaslaması ile basitleştirilmiş dikdörtgen kesitli ve tamamen yansıtıcı uzun bir koridor yapısında ele alınmıştır. Bu konuda yürütülen son çalışmada Sü Gül et al. [20] DEM'in metro istasyonlarında uygulamasının ışın-izlemeye göre özellikle çınlama süresi kestirimlerinde konuma bağlı olarak daha gerçekçi sonuçlar verdiğini desteklenmiştir. Ayrıca, oda akustiğinde farklı benzetim yöntemleri üzerine derlemesinde uzun yapılara da referans vererek Navarro ve Escolano [21] akustik enerji yayılımı benzetimlerinde difüzyon denklemi modelinin (DEM) kısa süreli çözümleme yükü ile etkili ve doğru bir yöntem olduğunu vurgulamaktadır.

Özetle, farklı teoriler farklı koşullar için geçerlidir ve vaka özelinde bugüne kadar geliştirilen teorilerin avantajları ve kısıtlamaları dikkate alınarak bir tercih yapılmalıdır. Genel olarak ışın-izleme yöntemi hala pratikte en uygulanabilir yöntem olmakla beraber çınlama süresi gibi tasarım sürecinin ilk fazlarında yararlanılan parametrelerde mekân içi malzeme dağılımlarına bağlı olarak bir miktar fazla tasarıma (over-design) sebebiyet verebilmektedir. Bu açıdan oda akustiğinde, bu çalışma özelinde metro istasyonları gibi uzun yapılarda, difüzyon denklemi modeli uygulaması hem çözümleme süreleri hem de özellikle çınlama süresi kestirimlerinde ışın-izleme tekniğine göre avantajlı olmakla beraber numerik çözümleri için özel yazılımlar gerektirmektedir. Ayrıca, sonuçların doğru bir şekilde ele alınması ve pratiğe uygulanabilirliği için denklemin geçerlilik limitlerinin akustik tasarımcı tarafından tamamen anlaşılmış ve özümsemiş olması gerekir. Aksi takdirde sonuçlar geçerliliği olmayan konfigürasyon veya yapılarda yanıltıcı olabilir. Yöntem taramasını takiben bu çalışmada ülkemizde istasyon akustiği tasarımında dünyadaki çalışmalara öncü nitelikte ve sayıda örneğin ele alındığı bir deneyimin özeti olarak hala geçerliliğini korumakta olan ışın-izleme metodu kestirim yöntemi destekli tasarım süreç ve sonuçları bir sonraki başlıkta ele alınmaktadır.

2.2. İstasyon akustiği tasarım ilkeleri üzerine araştırmalar

Metro istasyonlarında öncelikli olarak yangın, bakım-onarım kolaylığı, hijyen, vandallık ve terör saldırılarına karşı hasar görebilirlik gibi durumlar değerlendirildiği için; kullanılan iç mimari yüzey bitiriş malzemeleri genellikle seramik, taş gibi yüksek yansıtıcılıkta ve sertlikle olmaktadır. İstasyon hacimlerindeki büyüklük düşünöldüğünde, bu malzemeler uzun çınlama süresine sebep olarak düşük konuşma anlaşılabilirliğine [22] ve güröltü kirliliği problemlerine yol açmaktadır. İstasyon akustiği tasarımına yönelik yapılan çalışmalarda, istasyon mimarisi ile ses yutucu ve/veya saçıcı özellikteki malzemelerin kullanım yerleri ve miktarlarının ortam akustiğine olan etkisi sorgulanmaktadır. Bu çalışmalarda istasyon içi akustik konfor koşullarının oluşturulması ve anons sistemlerinin anlaşılabilirliğinin sağlanabilmesi için kullanılan akustik analiz parametreleri, ses basıncı düzeyi (SPL), erken sönümleme süresi (EDT), çınlama süresi (RT), konuşmanın anlaşılabilirliği indisi (STI) ve kulaklar arası işitilen seslerin benzersizliğinin ölçümü olan IACC (interaural cross correlation)'dir.

Metro tasarımı için birincil değişken istasyonun kesit şeklidir. Nowicka'nın [23] çalışmasına göre konuşmanın anlaşılabilirliği, daha büyük hacme sahip olsa bile dikdörtgen kesitli istasyonlarda eliptik kesitli istasyonlara göre daha yüksektir. Kim ve Soeta [24] farklı yükseklik ve genişliklerde istasyon mimarilerini ele aldığı benzetim çalışmasında küçük kesit alanlı istasyonlarda, düşük çınlama süresi ile yüksek STI ve SPL değerleri gözlemişlerdir. Çalıştıkları mimari kesit, aç kapa tipi istasyonlarda tren hatlarının yanlarda ve platformun ada formunda ortada olduğu düzendedir. Bu kesitte istasyon kesit genişliği veya platform üzeri tavan yüksekliği azaltılarak istasyon kesit alanı 10 m² düşüröldüğünde STI'nın 0,01 mertebesinde arttığı gözlenmiştir. Fakat platform genişliği ve istasyon yüksekliğinin herhangi bir akustik iyileştirmeye neden olmadığı sonucuna ulaşılmıştır. Kang [25] uzun yapılar üzerine teorik hesaplamalarla yaptığı karşılaştırma çalışmada, genişlik/yükseklik oranı 1:4 olan yapılarda, aynı kesit alanına sahip kare kesitli yapılardakine benzer veya daha fazla düzeyde ses azaltımı olabildiği sonucuna varmıştır.

İşlevsel ve alansal sınırlar gözetilerek istasyon geometrisine ve hacimlerine büyük ölçüde müdahale edilemediği düşünöldüğünde, istasyon akustiğini belirleyen en önemli değişken iç mimari malzeme bitirişleri olmaktadır. Kim ve Soeta [24] yaptıkları çalışmada, değişik ses yutuculuğa sahip malzemelerin platform üzeri tavanında ve döşemesinde, tren hattı yan duvarlarında kullanıldığı farklı durumlar oluşturarak, STI, SPL ve RT parametrelerinin değişimlerini gözlemişlerdir. Çalışmalarında düşük SPL ve RT değerleri ile yüksek STI sonuçlarına ulaşmak için mekân içi ses yutumunun fazla olması gerektiğine dikkat çekerek, platform tavanı ve döşemesine 100m²/sabin değerinde yutuculuk eklendiğinde STI değerini 0,03 arttırdığını bulmuşlardır. Diğer yandan istasyon gibi yolcu dolaşımının yoğun olduğu bir alanda döşemede ses yutucu malzeme kullanımı, malzemenin dayanıklılığının az olması sebebiyle pratik olarak mümkün değildir. Sirkölasyon alanlarında dayanıklı, sürdürülebilir malzeme kullanılması gerekliliği düşünöldüğünde, yutucu malzeme uygulaması için en uygun alanlar tavan alanları [22] ve yolcularca ulaşılması kolay olmayan duvar yüzeyleridir. Kang [26] ölçekli modeller üzerinde yaptığı ölçümlerle ses yutucu ve oluklu saçıcı malzemelerin yerleşimlerinin çoklu hoparlörlerin yer aldığı uzun yapılarda STI'a etkisini değerlendirmiştir. Ses yutucu malzemelerin, hoparlörlerin ortalarında ve dağınık bir biçimde tünel hacmi boyunca kullanılması ile elde edilen STI değerleri, tek bir yüzeyde bütün olarak ses yutucu malzeme kullanımına oranla daha yüksek olmaktadır. Oluklu saçıcıların tünel boyunca kullanımı çınlamayı düşürmekte ve dolayısıyla STI'ı arttırmaktadır. Kim ve Soeta'nın [27] yaptığı bir diğer çalışmada istasyonlarda çeşitli ses yayıcı/saçıcıların kullanımının etkisi

akustik benzetim programı vasıtasıyla sorgulanmıştır. Çalışmada değişik yerlerde saçıcı/yayıcı kullanımının STI değerlerini arttırabildiği anlaşılmıştır.

Farklı bir tasarım ögesi olarak düşünüldüğünde, yeni yapılan istasyonların pek çoğunda, güvenlik ve iklimlendirmenin kontrolü gibi sebeplerle kullanılan platform ayırıcı kapı sistemleri (PAKS)'nin de istasyon içi akustik ortama etkisinin değerlendirildiği çalışmalar bulunmaktadır [28].

3. ÜLKEMİZDE İSTASYON YAPILARI AKUSTİK TASARIMI

Bu bölümde ülkemizde yer alan örnek bir metro istasyonu için yapılan akustik değerlendirmeler sunulmaktadır. Yapılan çalışmada, mevcut metro istasyonu tasarımının çınlama süresi limitine uygunluğu, trenlerin oluşturduğu gürültü düzeylerinin kontrolü, acil durum havalandırma fanlarının 22,5 metre mesafede oluşturacağı ses basıncı düzeyleri ve anons sistemlerinin anlaşılabilirliği kontrol edilmiştir. İstasyon akustik değerlendirmesinde, bilgisayar benzetimlerinden yararlanılmıştır. Benzetimler için ODEON yazılımı 8.5 sürümü kullanılmıştır.

3.1. Peron ve bilet holü alanları oda akustiği modeli ve malzeme özellikleri

Oluşturulan peron ve bilet holü modellerine ait benzetim programı görüntüleri Şekil 2'de verilmektedir. Peron ve bilet holü modelinde kullanılması planlanan malzemelerin ses yutma katsayıları (Tablo 2) sadeleştirilmiş akustik modele işlenmiştir.



Şekil 2. Peron alanı (sol) ve bilet holü alanı (sağ) benzetim modeli görüntüleri

Tablo 2. Benzetimlerde kullanılan malzemelerin tanımları ve ses yutma katsayıları

Malzeme Konumu	Malzeme Tanımı	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1kHz	2kHz	4kHz
Yarı-açık alan	50/ %50 Yutucu	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Ray hattı	100/Kaba beton yüzey	0,02	0,03	0,03	0,03	0,04	0,07
Döşeme yüzeyi	2018/Terrazzo	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01
Duvar yüzeyleri	4000/Seramik-Granit Kaplama	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
Cam yüzeyler	602/Cam	0,15	0,05	0,03	0,03	0,02	0,02
Boyalı beton yüzeyler	3004/Boyalı Beton	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,05
Kapılar	5506/Metal	0,05	0,10	0,10	0,10	0,07	0,02
Perfore metal arkası yüzeyler	2533/ Delikli metal asma tavan paneli (açıklık oranı %19,7), arkasında boşluk içerisinde (200mm) dokumasız kumaş ve 30mm taşıyünü	0,40	0,75	0,90	0,70	0,75	0,75

3.2. Gürültü kaynaklarının modellenmesi

Benzetimlerde iki gürültü kaynağı kullanılmıştır: trenler ve tünel acil durum havalandırma fanları. Trenler çizgisel ses kaynağı olarak modellenmiştir. Trenlerin emisyon düzeyleri RMR 96 dokümanında önerilen SRM2 yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. Hesaplama IMMI 6,3 yazılımından yararlanılmıştır. Trenlerin istasyona girerken frenlerinin devrede olduğu ve istasyona giriş hızlarının 50km/saat olduğu kabul edilmiştir. En yoğun sefer tarifesine göre 2 dakika aralıklarla saatte 30 tren geçişi olacağı hesaplamalarda dikkate alınmıştır.

Tünel havalandırma fanları kaynaklı gürültü kontrolü için yürütülen benzetim çalışmalarında, üretici firmanın ilettiği susturucular devredeyken elde edilen ses gücü düzeyi kullanılmıştır. Tünel içinde TVF ve EXF kodlu, dörder adet toplam 8 fan kullanılması öngörülmektedir. Fanlar noktasal kaynak olarak modellenmiştir.

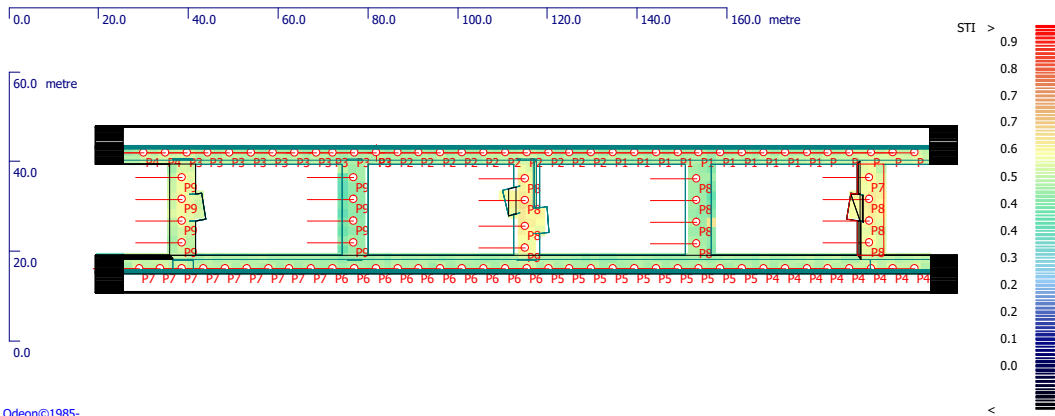
3.3. Benzetim sonuçları

Akustik benzetimler sonucu farklı frekanslarda elde edilen çınlama süreleri peron alanında 500Hz'de 1,31 saniye, bilet holü alanında ise 500 Hz'de 1,12 saniye olarak hesaplanmıştır. Yönetmelik gereğince çınlama süresi, üst limit olan 1,4 saniyenin altında kalmaktadır.

Trenlerin istasyona giriş durumu için yapılan benzetimlerde platform kenarından 1,8 metre uzaklıkta farklı alıcı noktaları tanımlanmıştır. Alıcı noktalarında elde edilen verilere göre gürültü düzeyleri, yönetmelik ile uyumlu bir şekilde limit altında, birinci alıcı noktasında 69,7dBA, ikinci alıcı noktasında ise 67 dBA olarak bulunmuştur.

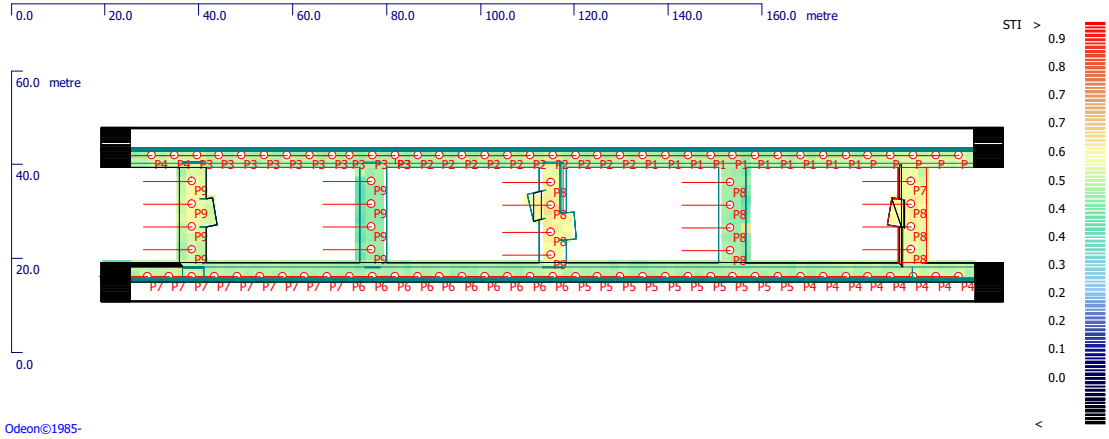
Tünel havalandırma fanlarının sekizinin de çalıştırılması sonucunda fanlardan 22,5 metre uzaklıkta belirlenen alıcı noktalarında oluşacak gürültü düzeyleri 69,7dBA ve 67dBA olarak hesaplanmıştır. Değerler yönetmelikte müsaade edilen üst sınır değer 80dBA'nın altındadır.

Konuşmanın anlaşılabilirliği analizlerinde acil durum senaryosunun kontrolü için istasyon içi mekanik aksamın çalışmasıyla oluşan gürültü düzeylerinin arka plan gürültüsü olarak belirtilmesi ve analiz bu tür gürültünün varlığında yapılması gereklidir. Burada ÇGDYY'de istasyon içinde izin verilen üst sınır gürültü düzeyine eşdeğer bir gürültü ölçütü olan tüm TVF ve EXF fanları (acil durum tünel havalandırma fanları) çalışır durumdayken oluşan gürültünün oktav bantlarındaki ortalamaları, arka plan gürültüsü olarak tanımlanmıştır. İstasyon peron katında toplam 94 tane hoparlör bulunmaktadır. Tüm anons sisteminin çalışması durumunda elde edilecek STI dağılım haritası Şekil 3'de verilmektedir.



Şekil 3. Acil durum havalandırma fanlarının devrede olduğu durumda STI dağılım haritası

Anons sistemlerinin acil durum haricinde anlaşılabilirliğinin değerlendirilmesinde, havalandırma sistemi kaynaklı arka plan gürültüsü için ÇGYDD’de izin verilen üst sınır değer olan 55dBA’ye denk gelen NC eğrisi seçilmiştir. Bu koşula uygun olarak yapılan analizlerde peron alanında STI dağılım sonuçları Şekil 4’te sunulmaktadır. Peron ve bilet holünde havalandırma sistemi çalışır durumdayken konuşmanın anlaşılabilirliği dağılımında peron alanında 0,60; bilet holü alanında ise 0.68 ortalama STI değerleri elde edilmiştir. Bu sonuçlara göre peron ve bilet holünde konuşmanın anlaşılabilirliğinin “iyi” [29] derecede olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4. Havalandırma sistemi çalışır durumundayken peron alanında STI dağılım haritası

4. SONUÇ

Farklı yutuculuğa ve saçıcılığa sahip uygun malzemelerin kullanımı, hedeflenen istasyon akustiğine ulaşmak için önemli bir rol üstlenmektedir. Uygulanacak malzemelerin toplam yüzey alanı ve uygulama konumları akustik tasarımın başarısını belirlemektedir. Bununla birlikte, yutucu malzemeler veya genel kullanım tabiriyle “akustik malzemeler” genellikle standart yapı malzemelerine göre oldukça maliyetli olmaktadır. Gereğinden fazla miktarda kullanılan yutucu malzemeler, sürdürülebilir ve ekonomik bir çözüm olmamaktadır. Akustik tasarım, henüz inşaat başlamadan gerçekleştirilen benzetimler sayesinde ulaşılan gerçekçi bir malzeme kullanımı optimizasyonu gerektirir. Saha ölçümleri gelecek tasarımlar için önemli geribildirimler sağlasa da, her istasyon kendi başına tasarlanması gereken özgül alanlardır.

5. KAYNAKLAR

- [1] Baştürk, G., Kent içi raylı toplu taşıma sistemleri incelemesi ve dünya örnekleri ile karşılaştırılması. *Ulaştırma Haberleşme Uzmanlığı Tezi*, 2014.
- [2] TS-12127: *Şehiriçi Yollar-Raylı Taşıma Sistemleri Bölüm 1: Yeraltı İstasyon Tesisleri Tasarım Kuralları*. 1997.
- [3] TS-12186: *Şehiriçi Yollar-Raylı Taşıma Sistemleri Bölüm 2: Yerüstü İstasyon Tesisleri Tasarım Kuralları*. 1997.
- [4] Ulaştırma Bakanlığı, Metro Tasarım Kriterleri, http://www.ubak.gov.tr/BLSM_WIYS/DLH/tr/DOKUMAN_SOL_MENU/Rayli_Sistem_Kriterleri/20140228_153217_10288_1_10315.pdf
- [5] Xiaon, Gu., Railway environmental noise control in China. *Journal of Sound and Vibration*, 293(3-5), pp.1078-1085, 2006.
- [6] Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliği. T.C Resmi gazete, 27601, 4 Haziran 2010.

- [7] Kang, J., Scale modeling of train noise propagation in an underground station, *J. Sound Vib.*, 202(2), 298-302, 1997
- [8] Davies, H. G., Noise propagation in corridors, *JASA*, 53, 1253-1262, 1973.
- [9] Doak, P.E., Fundamentals of aerodynamic sound theory and flow duct acoustics, *J. Sound Vib.*, 28, 527-561, 1973.
- [10] Kang, J., A method for predicting acoustic indices in long enclosures, *Appl. Acoust.* 51(2), 169-180, 1997
- [11] Kang, J., Acoustics of long underground spaces, *Tunn. Undergr. Space Technol.*, 12(1), 15-21, 1997
- [12] Yang, L. N., Shield, B. M., Development of a ray-tracing computer model for the prediction of the sound field in long enclosures. *J. Sound Vib.* 229(1), 133-146, 2000.
- [13] Redmore, T. L., A theoretical analysis and experimental study of the behavior of sound in corridors, *Appl. Acoust.*, 15, 161-170, 1982.
- [14] Elorza, D.O., Room acoustics modeling using the raytracing method: implementation and evaluation, Licentiate Thesis, Department of Physics, University of Turku, Finland, 2005.
- [15] Sü Gül, Z., Odabaş E., Xiang N. and Çalışkan M., Diffusion equation modeling for sound energy flow analysis in multi domain structures, *JASA*, 145(4), 2703-2717, 2019.
- [16] Ollendorff, F., Statistical room-acoustics as a problem of diffusion, *Acustica*, 21, 236-245, 1969.
- [17] Kuttruff, H., *Room acoustics*, 4th ed., Spon Press, London, 2000.
- [18] Picaut, J., Simon, L., Polack, J.D., Sound field in long rooms with diffusely reflecting boundaries, *Appl. Acoust.* 56, 217-240, 1999.
- [19] Valeau, V., Picaut, J., Hodgson, M., On the use of a diffusion equation for room acoustic prediction, *JASA*, 119 (3), 1504-1513, 2006.
- [20] Sü Gül, Z., Odabaş E., Çalışkan, M., Acoustical Assessment of Subway Stations by Diffusion Equation Modelling, Proceedings of *Wespac 2018: The 13th Western Pacific Conference on Acoustics*, New Delhi, India, 11-15 November 2018.
- [21] Navarro, M., Escolano, J., Simulation of building indoor acoustics using an acoustic diffusion equation model. *J. Build. Perform. Sim.*, 8(1), 3-14, 2015.
- [22] Sü, Z., Çalışkan, M., Acoustical design and noise control in metro stations: case studies of the Ankara metro system, *Build. Acoust.* 14(3), 231-249, 2007.
- [23] Nowicka, E., Assessing the acoustical climate of underground stations, *Int. J. Occup. Safety Ergon. (JOSE)*, 13(4), 427-431, 2007.
- [24] Kim, Y. H., Soeta, Y., Architectural treatments for improving sound fields for public address announcements in underground station platforms. *Applied Acoustics*, 74(11), pp. 1205-1220, 2013.
- [25] Kang, J., Sound attenuation in long enclosures. *Building and Environment*, 31(3), 245-253, 1996.
- [26] Kang, J., Improvement of the STI of multiple loudspeakers in long enclosures by architectural treatments. *Applied Acoustics*, 47(2), 129-148, 1996
- [27] Kim, Y. H., Soeta, Y., Design of diffusive surfaces for improving sound quality of underground stations. *International Symposium on Room Acoustics*, 2013.
- [28] Soeta, Y., Shimokura, R., Change of acoustic characteristics caused by platform screen doors in train stations. *Applied Acoustics*, 73(5), 535-542, 2012.
- [29] Beranek, Leo L. *Acoustical Measurements*. 3rd ed. New York. ASA, 1998