

Taşıt Sürücülerinin Tüm Vücut Titreşim Maruziyetlerinin İş Sağlığı ve Güvenliği Açısından Değerlendirilmesi

Evaluation of Whole Body Vibration Exposures for Vehicle Drivers in terms of Occupational Health and Safety

Akif YAVUZ¹ 

¹*İstanbul Teknik Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü, İstanbul, 34437, Türkiye*

Öz

Şoförlük, birçok sektörde kilit rol oynayan önemli bir meslektir. Taşımacılık, lojistik, kamu hizmetleri, kurye dağıtım hizmetleri ve turizm gibi pek çok sektörde taşıt sürücüleri büyük bir gerekliliğe sahiptir. Ancak, bu mesleğin içinde bulunmak bazı sağlık risklerini de beraberinde getirebilir. Özellikle taşıt koltuklarında meydana gelen titreşimler, sürücülerin tüm vücut titreşimine maruz kalmasına neden olabilir. Bu nedenle, bu titreşimlerin İş Sağlığı ve Güvenliği mevzuatlarına uygun olarak değerlendirilmesi son derece önemlidir. İş sağlığı ve güvenliği mevzuatlarına göre, işverenler çalışanlarının belirli bir titreşim maruziyeti altında çalışmalarını sağlamakla yükümlüdür. İş yerlerinde çalışanların maruz kaldığı titreşim değerleri, iş sağlığı ve güvenliği yönetmelikleri tarafından belirlenen eylem ve sınır değerleri arasında olmalıdır. Aynı zamanda, taşıt sürücülerinin rahatlığı ve ergonomisi açısından bu titreşimlerin de göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Bu çalışma kapsamında, gerçek bir taşıtın temsili olan teorik bir üç serbestlik dereceli taşıt modeli geliştirilmiştir. Bu model üzerinde farklı yol pürüzlülükleri (beton, asfalt, parke, toprak, stabilize) kullanılarak deneysel yol girdisi sağlanmıştır. Bu şekilde, farklı yol pürüzlülüklerinde taşıt koltuklarında meydana gelen titreşimler, zaman ve frekans tabanında incelenmiştir. Ayrıca, taşıtın dizayn parametrelerinin koltuk titreşim genliklerine olan etkisi, iş sağlığı ve güvenliği mevzuatı kapsamında değerlendirilmiştir. Sonuç olarak, farklı yol türlerinde ideal bir taşıt modeli tasarlanmıştır. Bu model, tüm yol çeşitlerinde maruziyet sınır değerinin altında kalan koltuk titreşim genliklerine sahiptir. Bu çalışma, taşıt sürücülerinin sağlığını ve konforunu korumak amacıyla mevzuatlara uygun tasarımların ne kadar önemli olduğunu vurgulamaktadır. Taşıt endüstrisindeki bu tür iyileştirmeler hem sürücülerin sağlığını korumak hem de iş sağlığı ve güvenliği standartlarına uymak için hayati bir öneme sahiptir.

Anahtar Kelimeler: İş sağlığı ve güvenliği, koltuk titreşimleri, mesleki maruziyet sınır değeri

Abstract

Driving is an important profession that plays a key role in many sectors. Vehicle drivers are essential in many sectors such as transportation, logistics, public services, courier delivery services and tourism. However, being in this profession can also bring some health risks. In particular, vibrations in vehicle seats can expose drivers to whole-body vibration. Therefore, it is extremely important that these vibrations are assessed in accordance with Occupational Health and Safety legislation. According to occupational health and safety legislation, employers are obliged to ensure that their employees work under a certain vibration exposure. The vibration values to which employees are exposed in workplaces should be between the action and limit values set by occupational health and safety regulations. At the same time, these vibrations need to be taken into account in terms of the comfort and ergonomics of vehicle drivers. In this study, a theoretical three-degree-of-freedom vehicle model is developed to represent a real vehicle. Experimental road input is provided by using different road roughnesses (concrete, asphalt, paving, dirt, destabilized) on this model. In this way, the vibrations occurring in the vehicle seats at different road roughnesses are analyzed in time and frequency domain. In addition, the effect of vehicle design parameters on seat vibration amplitudes is evaluated within the scope of occupational health and safety legislation. As a result, an ideal vehicle model is designed for different road types. This model has seat vibration amplitudes below the exposure limit value on all road types. This study highlights how important it is to design in accordance with legislation to protect the health and comfort of vehicle drivers. Such improvements in the vehicle industry are vital both to protect the health of drivers and to comply with occupational health and safety standards.

Keywords: Occupational health and safety, seat vibrations, occupational exposure limit value

I. GİRİŞ

Titreşim, insan sağlığı, performansı ve konforu üzerindeki fizyolojik ve psikolojik etkilerle birlikte hareket hastalığı gibi etkilere sahiptir. Titreşimin insanlar üzerindeki etkilerini azaltmak amacıyla farklı kuruluşlar ve araştırmacılar uzun süredir çalışmalar yürütmektedirler. Taşıt sürücü koltuğunda meydana gelen ivmeler sürücülerin konforunu önemli ölçüde etkileyebilmektedir. İvme artışı veya azalışının insan sağlığı üzerindeki etkileri matematiksel değerlendirmelere dayalı olarak incelenebilmektedir [1].

İşyerlerinde yürütülen İş Sağlığı ve Güvenliği (İSG) faaliyetleri ile işverenler, çalışanların fiziksel ve ruhsal yönden tam bir iyilik halinde olmalarını sağlamayı amaçlamaktadır. Bu kapsamda çalışma ortamındaki tehlikelerin ve bu tehlikelerden kaynaklanan risklerin belirlenmesi gerekmektedir. İşverenler belirlenen bu riskleri ortadan kaldıracak veya kabul edilebilir seviyeye getirecek önlemleri İSG mevzuatına uygun olarak almakla yükümlüdür. Bu amaçla işyerlerinde yapılacak risk değerlendirme çalışmaları, işyerine uygun bir risk analiz yöntemi ile detaylı olarak uygulanmalı ve alınması gereken önlemler belirlenmelidir [2-4]. Titreşim maruziyetlerinin İş Sağlığı ve Güvenliği yönetmeliği açısından incelenmesini ve iş yeri faaliyetlerinin titreşim ve gürültü maruziyeti açısından kontrol altına alınmasını içeren literatürde farklı çalışmalar mevcuttur [5-8].

Titreşim, çalışanların iş yerlerinde kullandıkları makine ve ekipmanlar nedeniyle maruz kaldıkları fiziksel risk faktörlerinden biridir. Yapılan işin türüne göre el-kol veya tüm vücut titreşimine maruz kalırlar. Bu maruziyet sonucunda çalışanlar başta kas iskelet sistemi olmak üzere çeşitli sağlık sorunları yaşayabilmektedir. Özellikle taşıt sürücülerini koltuk üzerinden gelen ve tüm vücudu etkileyen dikey titreşimlere oldukça maruz kalmaktadır [9, 10]. Türkiye'de 2012 yılında yürürlüğe giren 6331 sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu uyarınca işverenler, işyerlerinde çalışanların sağlık ve güvenliğini sağlamak amacıyla risk değerlendirmesi yapmakla yükümlüdür. Ayrıca bu kanun uyarınca çıkarılan titreşim yönetmeliğine göre çalışanların maruz kalabilecekleri titreşim türleri sınır değerleri Tablo 1'de verilmiştir. Yapılan ölçümler ile titreşim maruziyet değerleri belirlenmeli ve uygun olmayan değerler için alınacak önlemler ile bu değerler kabul edilebilir seviyeye indirilmelidir [11].

Tablo 1. İSG yönetmeliği uyarınca maruziyet eylemi ve maruziyet türleri için sınır değerleri [12].

Maruziyet Tipi	Maruziyet Eylem Değeri [m/s^2]	Maruziyet Sınır Değeri [m/s^2]
El-kol titreşimi	2,5	5
Tüm vücut titreşimi	0,5	1,15

Taşıt koltuk titreşim konforunun, farklı yol pürüzlülükleri ve hızlarında nasıl değiştiğini ölçmek için bir dizi test gerçekleştirilmektedir. Elde edilen test verilerine dayanarak, ideal sürücü koltuk titreşime sahip araçlar üretmeye çalışılmaktadır. Farklı üreticilerin araçlarının karşılaştırılması, konfor değerlendirmeleri için kritik öneme sahiptir ve aynı zamanda araçların üretim aşamalarında önemli kararlar alınmasına da yardımcı olmaktadır [13-15].

Seyir durumundaki tüm taşıtlar genellikle yoldan gelen tahrikler nedeniyle titreşim hareketi yaparlar. Bu titreşimler genellikle 0 ile 25 Hz frekans aralığında görülür [16]. Aracın tekerlek sistemleri, yoldan gelen uyarıları aks, gövde yayları ve sönüm elemanları aracılığıyla gövdeye ileterek bu titreşimlere neden olur. Genellikle dört tekerleği olan taşıtların gövdeleri, yatay, düşey, yalpa ve başurma titreşim hareketleri yapabilirler. Aynı zamanda taşıt içindeki kişi ile taşıt gövdesi arasında, koltuk sistemi olarak kabul edilen yaylar ve sönüm elemanları bulunur [17].

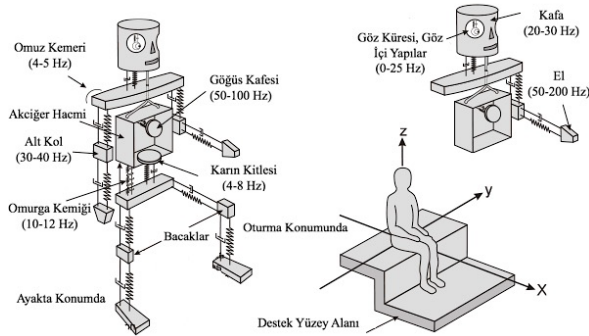
Taşıt tasarım süreci, belirli gereksinimleri ve operasyonel şartları karşılamak zorundadır. Bu gereksinimler temel olarak sürücü ve yolcular için sürüş güvenliği ve sürüş konforunu içerir. Ayrıca bazı standartlara göre tanımlanır, doğrulanır ve test edilir [18-21].

Taşıt sistem dinamiğinin bir girdisi olan yol pürüzlülüğü tekerleğe aktarıldıktan sonra taşıtın elastik parçaları ile aks gövdesine iletilir [22]. Yol pürüzlülüğünün yanı sıra sürüş karakteristikleri ve yol uyarımından gelen titreşim sinyallerinin koltuğa aktarılması için bir karakteristik olan titreşimin iletim yolu sürüşte rahatsızlığa neden olmaktadır. Dikey yöndeki koltuk titreşimlerine karşılık gelen araç konforu, sürücü sağlığını etkileyen önemli bir parametredir. Sürücü koltuğu ile ilgili araç konforunu değerlendirmek için, sürücü koltuğunun zaman alanındaki rms dikey ivme verileri konforun tanımlama parametresi olarak kullanılmaktadır [23]. Dikey koltuk ivme genliklerinin konforlu sürüş üzerindeki etkileri, seçilen aracın matematiksel bir modeli ile araştırılmıştır [24].

Farklı yollar boyunca toplanıp taşıt üzerine aktarılan titreşimler, tekerlek yükü salınımlarına neden olur ve

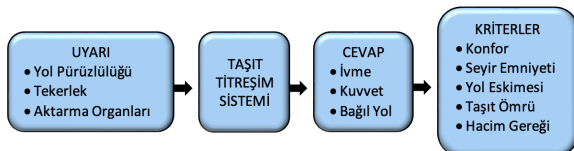
bu, araç tekerleklerinin yol ile etkileşimini değiştirir. Bu etkileşimin sonucunda ortaya çıkan temasın çeşitli sonuçları vardır. Yol ile olan etkileşim yüksekse, yolun aşınması riski artarken, düşükse, seyir güvenliği azalabilir. Yoldan gelen titreşimlerin neden olduğu çeşitli kuvvetler, aracın dayanıklılığını etkiler. Bu etkileme, yol kaynaklı ivmenin büyüklüğüne bağlı olarak aracın ömrünün kısalmasına yol açabilir [25].

Şekil 1'de gösterildiği gibi, insan vücudunun farklı bölgelerinin her birinin kendine özgü doğal frekansları mevcuttur. İnsanların organlarının doğal frekansları ile eşleşen bir zorlama frekansı olduğunda, insan vücudunun belirli bölgeleri rezonans frekansında titreşmeye başlar. Bu fenomen insan sağlığı açısından oldukça tehlikelidir ve meslek hastalıklarına neden olabilmektedir. Sistem rezonansa girdiğinde titreşim genliği sürekli olarak artma eğilimindedir. Artan titreşim genlikleri organların ciddi derecede sarsılmasına ve zarar görmesine neden olabilir. Bu nedenle, taşıtın doğal frekansı ile organların frekanslarının denk gelmemesi hem organların zarar görmemesi hem de taşıt konforu açısından daha iyidir.



Şekil 1. Farklı organların doğal frekansları [26].

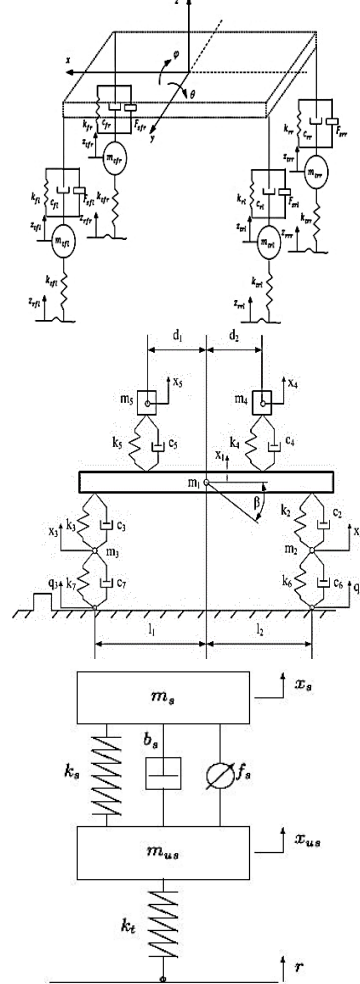
Taşıt dinamik modeli, yalnızca yolun pürüzlülüğü tarafından uyarılmaz. Taşıtta titreşime sebep olan uyarılar Şekil 2'de gösterildiği gibi aynı zamanda tekerlekler ve aktarma organları olabilir. Taşıt dinamik modeline etkileyen ve titreşime sebep olan bu uyarılar taşıt titreşim modeline etki ederek, ivme, kuvvet ve bağıl yol cevaplarına neden olurlar. Elde edilen bu cevaplar değerlendirilerek taşıt, konfor, seyir emniyeti, yol eskimesi, taşıt ömrü ve hacim gereği gibi kriterler ile değerlendirilebilir.



Şekil 2. Taşıt titreşim sistemi blok şeması [27].

Taşıt titreşim modelleri, Şekil 3'te görüldüğü gibi üçe ayrılır: iki izli tam taşıt modeli, tek izli yarım taşıt modeli ve tek boyutlu çeyrek taşıt modeli. Yarım taşıt modeli, tüm taşıt modelinin boyuna ekseninde simetrik kabul edilerek oluşturulmuştur. Taşıt sürücüsü

koltuğunda meydana gelebilecek titreşimleri değerlendirmek için, kolay analiz edilebilirliği nedeniyle çeyrek taşıt modeli en iyi olanakları sunmaktadır. Taşıt dizayn parametrelerinin koltuk davranışı üzerine etkilerini net bir şekilde gözlemek için bu çalışmada çeyrek taşıt modeli kullanılmıştır.



Şekil 3. Örnek taşıt dinamik modelleri a) İki izli tam taşıt modeli b) Tek izli yarım taşıt modeli c) Tek boyutlu çeyrek taşıt modeli [28,29].

Bu çalışmada, İSG mevzuatına uygun olarak yol pürüzlülüğü ve taşıt sürücüsü koltuğu sönümleyici karakteristiğinin konforlu sürüş üzerindeki etkisini araştırmak için üç serbestlik dereceli bir araç titreşim modeli geliştirilmiştir. Taşıtın matematiksel modeli üzerinde farklı parametrelerinin etkileri net olarak gözlenebildiğinden dolayı çalışmada gerçek bir taşıt kullanılmamıştır. Gerçek bir taşıt üzerinde çalışma ve operasyon parametrelerini değiştirmek ve farklı yol pürüzlülüklerine maruziyeti modellemek mümkün olmadığı için çalışmada matematiksel model kullanılmıştır. Kullanılan bu doğrusal matematiksel modelin gerçek taşıtı temsil edebileceği düşünülmektedir. Bu çalışmada, yolcu taşımacılığında kullanılan ve toplu taşıma sistemlerinin önemli bir parçası olan otobüs taşıtı modellenmiştir. Çalışmada kullanılan operasyonel ve dizayn parametreleri gerçek bir otobüsün parametrelerini temsil etmektedir.

Böylece İSG mevzuatına göre taşıt sürücülerinin tüm vücut titreşimleri açısından günlük maruziyet eylem değerlerinin altında konforlu sürüş gerçekleştirmeleri amaçlanmıştır. Geliştirilen taşıt titreşim modeli, doğrusal elastik yay ve sönümleyici elemanlardan oluşmaktadır. Matematiksel modelin girdisi olarak farklı yol tipleri için deneysel olarak elde edilen yol pürüzlülükleri kullanılmıştır. Böylece sistemin gereceğe yakın bir şekilde çalıştırılması amaçlanmıştır. Doğrusal hareket denklemleri, taşıt sürücü koltuğunun RMS ivme verileri gibi zaman serisi yanıtlarını elde etmek için Runge-Kutta zaman adımı entegrasyonu ile çözülmüştür. Böylece, otobüs sürücü koltuğunun frekans ağırlıklı RMS ivme verileri, araç konforunu değerlendirmek için ISO 2631-1'deki frekans ağırlıklı eğri ile belirlenmektedir. Böylece, taşıt sürücü koltuğunda oluşan frekans ağırlıklı RMS ivmeleri kullanılarak taşıt sürücüsünün tüm vücut titreşim maruziyeti, İSG mevzuatındaki Titreşimle İlgili Risklerden Korunmalarına Dair Yönetmelik kriterlerine göre değerlendirilmiştir. İdeal taşıt sürücü koltuğu sönümleyici karakteristiği tanımlanarak meslek hastalığı oluşum riskinden azaltılmıştır.

II. MATERYAL VE METOD

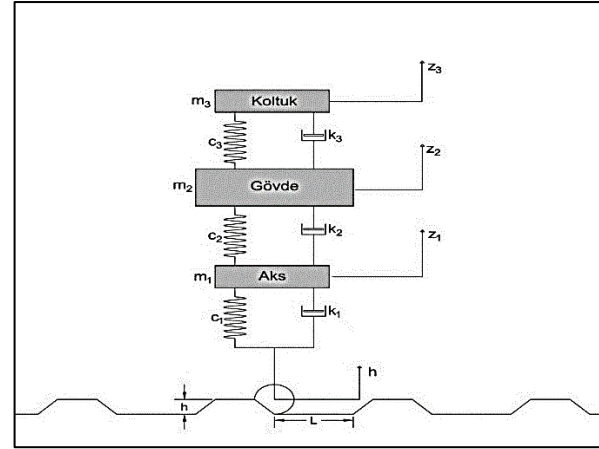
2.1. Üç Kütleli Taşıt Modeli

Bu çalışmada, taşıtın koltuk titreşimlerini incelemek için üç serbestlik dereceli doğrusal bir taşıt modeli oluşturulmuştur. Bu model, taşıtın dinamik hareketini açıklamak için yay, sönüm ve kütle elemanlarının Newton'un ikinci kanununa göre hareket denklemleri kullanılarak oluşturulmuştur. Bu sistemde üç serbestlik derecesi bulunmaktadır: koltuk (m_3), gövde (m_2) ve aksın (m_1) düşey yöndeki hareketleridir. Üç kütleli taşıt titreşim modeli, taşıt sürücü koltuk konforunu incelemek amacıyla oluşturulmuştur. Şekil 4'te gösterilen modelde aşağıdaki bileşenler bulunmaktadır:

- *Koltuk ve Sürücü Ağırlıkları (m_3):* Taşıt modelinin üst sisteminde taşıt koltuğu ve sürücüsünün ağırlıkları kullanılmıştır. Koltuğun sertlik (k_3) ve sönüm (c_3) değerleri bu sistemde yer almaktadır.
- *Gövde (m_2):* Orta bölümdeki sistemde taşıtın gövdesi ve toplam ağırlığı temsil edilir. Bu sistemin eşdeğer sertlik (k_2) ve amortisörlerin eşdeğer sönüm (c_2) değerleri de dikkate alınmıştır.
- *Aks Sistemi (m_1):* Alt taşıt sistemi olan aks sistemi, tekerlek/lastik/aks kütlelerinin eşdeğerini temsil eder. Bu sistem, sertlik (k_1) ve sönüm (c_1) katsayılarıyla ifade edilir. Bu modelde taşıt tekerleğinin sönüm oranı dikkate alınmamıştır ve ihmal edilmiştir.

Şekil 4'teki z_1, z_2, z_3, h sırasıyla aks, gövde, koltuk ve yolun düşey pozisyonlarını göstermektedir. Modelde verilen m_1, m_2, m_3 ise koltuk, gövde ve aks (tekerlek) kütlelerini temsil etmektedir. Bu model, taşıtın düşey yöndeki titreşimlerini analiz etmek ve taşıt konforunu değerlendirmek için kullanılır. Titreşimlerin doğal

frekansları, sertlik ve sönüm değerleri gibi parametreler üzerindeki etkileri incelenebilir. Bu tür analizler, taşıt tasarımı ve konforunun iyileştirilmesi için önemli bilgiler sağlamaktadır.



Şekil 4. Doğrusal taşıt modeli

Üç serbestlik dereceli doğrusal taşıt modelinin hareket denklemleri aşağıda verilmiştir:

$$m_3 \ddot{z}_3 + c_3 (\dot{z}_3 - \dot{z}_2) + k_3 (z_3 - z_2) = 0 \quad (1)$$

$$m_2 \ddot{z}_2 - c_3 (\dot{z}_3 - \dot{z}_2) - k_3 (z_3 - z_2) + c_2 (\dot{z}_2 - \dot{z}_1) + k_2 (z_2 - z_1) = 0 \quad (2)$$

$$m_1 \ddot{z}_1 - c_2 (\dot{z}_2 - \dot{z}_1) - k_2 (z_2 - z_1) + k_1 z_1 = k_1 h \quad (3)$$

Matris gösterimi şeklinde yazılan versiyonu düşünüldüğünde, M kütle, K yay elemanları, C sönüm elemanları matrisini ve R ise yol tahrik matrisini temsil etmektedir.

$$M = \begin{bmatrix} m_3 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$K = \begin{bmatrix} k_3 & -k_3 & 0 \\ -k_3 & k_2 + k_3 & -k_2 \\ 0 & -k_2 & k_1 + k_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$C = \begin{bmatrix} c_3 & -c_3 & 0 \\ -c_3 & c_2 + c_3 & -c_2 \\ 0 & -c_2 & c_2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$R = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ k_1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Yukarıdaki verilen dinamik denklemler durum değişkeni vektörleri (z) ile işleme girerek yol tahrik matrisine eşitlenir.

$$M \begin{bmatrix} \ddot{z}_3 \\ \ddot{z}_2 \\ \ddot{z}_1 \end{bmatrix} + C \begin{bmatrix} \dot{z}_3 \\ \dot{z}_2 \\ \dot{z}_1 \end{bmatrix} + K \begin{bmatrix} z_3 \\ z_2 \\ z_1 \end{bmatrix} = R \cdot h \quad (8)$$

Aşağıdaki denklemlerde, \hat{z} kompleks genliğinin ve \hat{h} kompleks uyarısının gerçel ve sanal kısımları vektörle gösterilmiştir (g: gerçel; s: sanal):

$$\hat{z}^T = (z_g, z_s) = (z_{3,g}, z_{2,g}, z_{1,g} / z_{3,s}, z_{2,s}, z_{1,s}) \quad (9)$$

$$\hat{h}^T = (h_g, h_s) \quad (10)$$

Elde edilen denklemlerin genel gösterimi aşağıdaki denklemde verilmiştir.

$$\begin{vmatrix} K - w^2 M & -wC \\ -wC & K - w^2 M \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} z_g \\ z_s \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} R_g \\ R_s \end{vmatrix} \cdot h \quad (11)$$

A B

Gerekli düzenlemeler yapıldığında,

$$\hat{z} = A^{-1} \cdot B \cdot \hat{h} \quad (12)$$

$$\frac{\hat{z}}{\hat{h}} = A^{-1} \cdot B \quad (13)$$

$$B^T = (0 \ 0 \ c_1 \ 0 \ 0) \quad (14)$$

Taşıt sisteminin doğal frekansları A matrisinden elde edilebilir. Çalışma kapsamında elde edilen üç serbestlik dereceli doğrusal taşıt modelindeki sönümsüz doğal frekanslar ve sönüm oranları aşağıdaki gibi verilmiştir. Taşıt sürücü koltuğu doğal frekansı (f_3) ve sönüm oranı (D_3):

$$f_3 = \frac{\vartheta_{koltuk}}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{c_3}{m_3}} \quad (15)$$

$$D_3 = \frac{k_3}{2\sqrt{c_3 m_3}} = \frac{k_3}{2m_3 \vartheta_3} \quad (16)$$

Taşıt gövdesi doğal frekansı (f_2) ve sönüm oranı (D_2):

$$f_2 = \frac{\vartheta_{gövde}}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{c_2}{m_2 + m_3}} \quad (17)$$

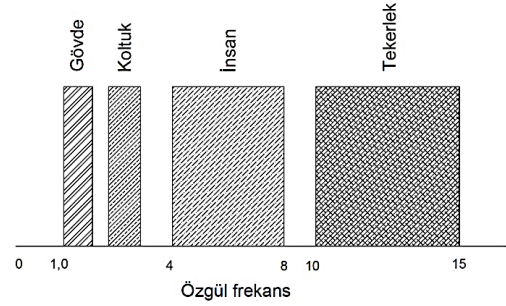
$$D_2 = \frac{k_2}{2\sqrt{c_2 m_2}} = \frac{k_2}{2m_2 \vartheta_2} \quad (18)$$

Taşıt aks bölgesi doğal frekansı (f_1):

$$f_1 = \frac{\vartheta_{aks}}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{c_1 + c_2}{m_1}} \quad (19)$$

Ortalama taşıt parametreleri ile yukarıda dinamik denklemleri verilen taşıt modeli çözüldüğünde, taşıt gövdesi, koltuk ve aks bölgesi doğal frekansları bölgeleri elde edilmiştir. Şekil 5'de bu frekans bölgeleri ve aralıkları gösterilmiştir. Gösterilen frekans bölgeleri

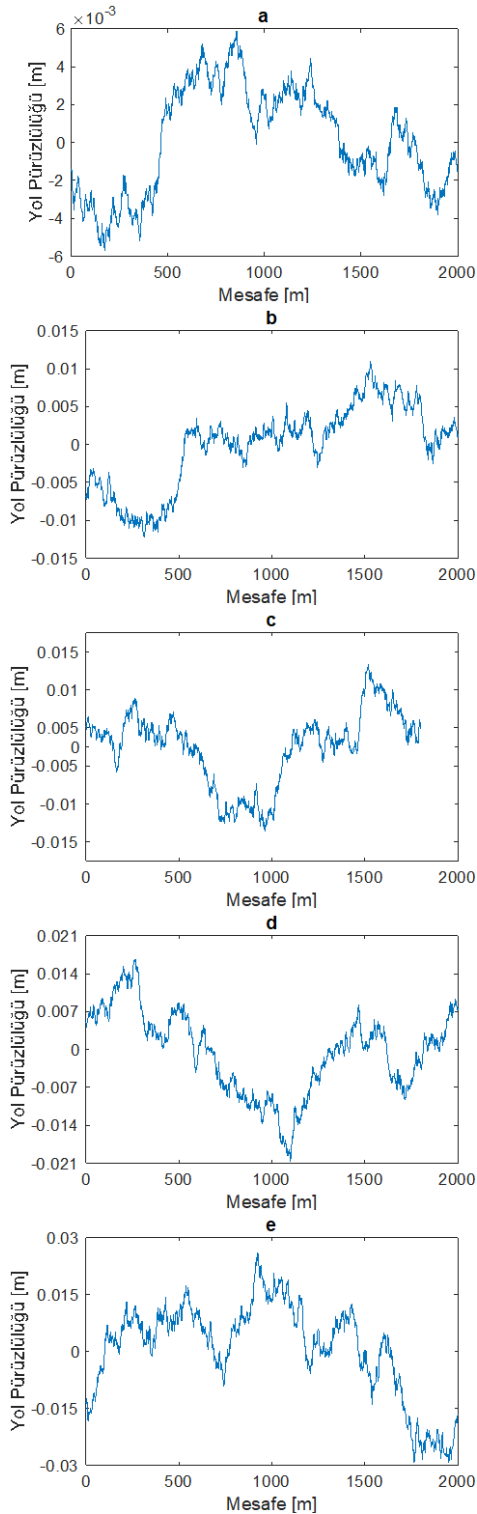
ve aralıkları taşıt gövdesini, koltuğu, insanı ve tekerleği temsil etmektedir. Şekil 5'de verilen bu frekans bölgeleri literatürden elde edilen ve literatür sonuçlarının derlemesi ile tanımlanan frekans aralıklarını temsil etmektedir [16].



Şekil 5. Farklı taşıt kısımları ve insan için doğal frekans bölgeleri (Hz) [16].

2.2. Yol Pürüzlülüğü

Taşıt dinamik modeli açısından en önemli dinamik uyarı, yoldan gelen yol pürüzlülükleridir. Yoldan gelen uyarıların ölçülmesi ve analiz edilmesi, taşıt titreşim analizi için oldukça önemlidir. Önceki bölümde oluşturulan taşıt modeline girdi fonksiyonu olarak yoldan gelen uyarılar tanımlanmıştır. Taşıt modelinde girdi olarak kullanılan yol pürüzlükleri deneysel çalışmalar ile 5 farklı yoldan elde edilmiştir. Beton, asfalt, parke, toprak, stabilize yol çeşitleri seçilerek buralarda ölçümler yapılmıştır. Yol pürüzlülüğü ölçüm mesafesi tüm yol çeşitleri için 2000 m olarak belirlenmiştir. Şekil 6'da görüldüğü gibi yol pürüzlülüğünün mesafeye göre grafikleri elde edilmiştir.



Şekil 6. Farklı yol tipleri için elde edilen yol yüzeyi pürüzlülük profilleri a) Beton yol b) Asfalt yol c) Parke yol d) Toprak yol e) Stabilize yol

2.3. Koltuk Üzerindeki Titreşimlerin RMS İvme Değerinin Hesaplanması

İnsanların tüm vücut titreşimlerine karşı hassasiyeti maruz kaldıkları frekanslara göre değişmektedir. Frekans ağırlıklandırma faktörleri, frekansların insanlar üzerindeki etkilerini değerlendirmektedir. Frekans ağırlıklandırma faktörleri ISO 2631-1'de

belirlenmiştir [30]. Bu çalışmada, dikey tüm vücut titreşimleri için W_k frekans ağırlıklandırma eğrisi kullanılmıştır. Taşıt koltuğunun RMS ivmesinin (a_{rms}) matematiksel gösterimi Denklem 20'de verilmiştir:

$$a_{rms} = \left\{ \frac{1}{T} \int_0^T [a(t)]^2 dt \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (20)$$

Yukarıdaki denklemde, $a(t)$ zamanın bir fonksiyonu olarak koltuk ivmesini, T saniye cinsinden ölçüm süresini temsil etmektedir.

W_k frekans ağırlıklandırma eğrisi, koltuğun düşey yöndeki frekans ağırlıklı RMS ivmelerini belirlemek için kullanılmaktadır. Taşıt sürücü koltuğunun frekans ağırlıklı RMS ivmesi ($a_{w,rms}$), aşağıdaki Denklem 21'e göre hesaplanır:

$$a_{w,rms} = \left[\sum_i (W_i a_{rms})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (21)$$

Yukarıdaki denklemde a_{rms} taşıt koltuğunun frekans ağırlıklı RMS ivmelerini, W_i ise ağırlıklandırma faktörünü temsil etmektedir. Titreşim sinyalleri incelenirken, titreşim seviyesini izlemek yerine RMS (Karekök Ortalama Kare) değerini izlemek, birçok durumda daha iyi sonuçlar verebilir. Örneğin, toplanmış bir sinyal içinde tek bir yüksek seviyeli darbe meydana gelebilir. Bu durumda, sinyalin titreşim genliği büyük olabilir, ancak RMS değeri çok fazla değişmeyebilir.

III. ARAYÜZ TASARIMI

MATLAB Graphical User Interface (GUI), kullanıcının aracın dizayn ve çalışma parametre değerlerini girmesine olanak tanır ve ardından sonuçları hızlı bir şekilde elde etmesini sağlar. Bu GUI, farklı araç değerlerini girdiğinizde hızlı iterasyonlar yaparak sonuçları karşılaştırmanıza olanak tanır. Genel olarak, bu MATLAB arayüzü şu öğeleri içerir:

- **Bilgi Giriş Kutucukları:** Kullanıcının aracın parametre değerlerini girebilmesi için kullanılan metin kutuları veya giriş alanlarıdır. Bu kutular, araç için gereken giriş değerlerini almak için kullanılır.
- **Uygulama Butonları:** Giriş değerlerinin hesaplanabilmesi veya işlenebilmesi için kullanılan düğmelerdir. Bu düğmeler, kullanıcının girilen parametrelerle işlem yapmasını sağlamaktadır.
- **Grafik:** Aracın sonuçlarını grafiksel olarak görüntülemek için kullanılan bir grafik alanıdır. Bu grafik, sonuçların görsel olarak analiz edilmesini kolaylaştırmaktadır.
- **Bilgi Sonuç Kutucukları:** Sonuçların sayısal olarak görüntülenebilmesi için kullanılan metin kutuları

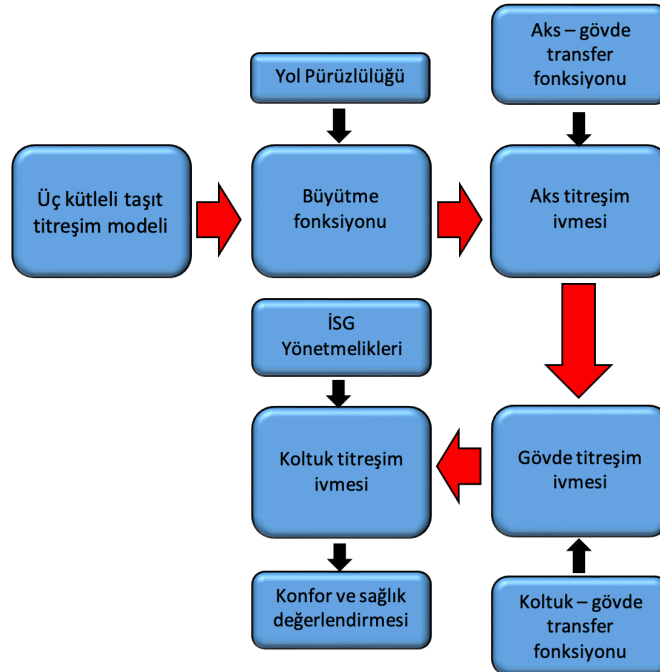
veya çıktı alanlarıdır. Bu kutular, işlem sonuçlarını kullanıcıya sunmaktadır.

Bu MATLAB arayüzü, kullanıcının taşıtlı ilgili farklı senaryoları hızlı bir şekilde değerlendirmesine ve

sonuçları görsel ve sayısal olarak incelemesine olanak tanımaktadır. Bu sayede, aracın performansını optimize etmek veya farklı dizayn parametre değerlerinin etkisini anlamak gibi çeşitli analizler yapılabilmektedir.



Şekil 7. Taşıtlı titreşimlerinin hesaplanması ve analizi için geliştirilen Matlab Arayüzü.



Şekil 8. MATLAB bilgisayar hesaplamaları akış şeması.

Şekil 7'de görülen MATLAB GUI arayüzü, kullanıcının modele giriş yapacak parametreleri tanımladığı bir arayüze sahiptir. Bu parametreler, taşıtlı modelindeki 3 farklı taşıtlı kısmı (koltuk, gövde, aks), 3

farklı elastik eleman sertlik değeri ve 3 çeşit sönüm elemanı katsayısı içermektedir. Bu parametrelerin bazıları taşıtlı kataloglarında bulunabilir, ancak çoğu mevcut araçlardan ölçümle elde edilmelidir. Ayrıca,

kullanıcı taşıt hızını ve yol profilini seçebilir. Yol profilleri A'dan E'ye (A çok iyi beton yol, E çok kötü stabilize yol) farklı yol kalitelerini temsil eder. Sol kısımda bulunan "veri değerlendirmesi" bölümündeki seçeneklere tıkladığımızda, istenilen grafikler orta kısımdaki alanda görüntülenir. Sağ bölümde ise girilen parametre değerlerinin hesaplanması ve sonuçların sonuç kutularında gösterilmesi sağlanır.

Farklı taşıt parametrelerinin de sisteme etkisini inceleyebilmek ve taşıt modelinde oluşan sonuçları hızlı ve etkili bir şekilde İSG mevzuatına göre değerlendirebilmek için MATLAB programı içerisinde bir Graphical User Interface (GUI) arayüzü geliştirilmiştir. Böylece çok farklı tipteki taşıtların (otomobil, kamyon, kamyonet, otobüs, minibüs) dizayn ve çalışma parametrelerini, çalışma kapsamında oluşturulan arayüze girerek etkili sonuçlar alınabilir. Farklı sektörlerde şoförlük yapan taşıt sürücülerin İSG mevzuatına göre tüm vücut titreşim değerlendirmesi yapılabilir. Böylece meslek hastalıkları önlenir. Bilgisayar programı (MATLAB) yardımıyla geliştirilen algoritmanın akış şeması Şekil 8'de detaylı olarak verilmiştir. Bilgisayar programının hesaplama süreci şu adımları içerir:

- *Üç kütleli taşıt titreşim modeli oluşturulması:* İlk adımda, üç serbestlik dereceli doğrusal taşıt modeli oluşturulur. Bu modelde taşıtın koltuk, gövde ve aks gibi farklı kısımları dikkate alınır.
- *Büyütme fonksiyonlarının yol pürüzlülüğü ile çarpılması:* Oluşturulan model kullanılarak, büyütme fonksiyonları hesaplanır. Bu büyütme fonksiyonları, yol pürüzlülüğünün taşıt üzerindeki etkisini gösterir. Koltuk üzerindeki ivme değerleri bu büyütme fonksiyonları ile çarpılarak hesaplanır.
- *Taşıt koltuğundaki rms ivme değerlerinin frekans ağırlık değerleri ile ağırlıklandırılması:* İvme değerleri, frekans ağırlık değerleri kullanılarak (W_k) ağırlıklandırılır. Bu işlemle titreşimlerin frekans bileşenleri dikkate alınır [26].
- *Koltukta meydana gelen titreşimlerin farklı yol pürüzlülükleri için RMS ivmelerinin hesaplanması:* İvme değerleri, farklı yol spektrum yoğunluklarına göre kök ortalama kare (RMS) değerleri hesaplanır. Bu, titreşimlerin farklı yol koşullarına göre nasıl değiştiğini belirlemeye yardımcı olur.

- *Koltuk üzerindeki frekans ağırlıklı sürücü koltuğu RMS ivmelerinin İSG mevzuatına göre sağlık uyarı bölgesindeki yeri hakkında çalışma:* Son adımda, elde edilen RMS ivme değerleri kullanılarak sürücü koltuğunun sağlık uyarı bölgesindeki konumu İSG mevzuatına uygun olarak değerlendirilir. Bu, taşıtın titreşim düzeylerinin iş sağlığı ve güvenliği gerekliliklerine uygunluğunu belirlemek için yapılır.

Bu süreç, taşıt titreşimlerinin sağlık ve güvenlik açısından uygunluğunu değerlendirmek ve gerektiğinde önlemler almak için kullanılan bir bilgisayar programı için temel adımları özetlemektedir.

IV. BULGULAR

Kurulan matematiksel modele girdi olarak 5 farklı yol pürüzlülüğü (beton, asfalt, parke, toprak, stabilize) kullanılarak zaman tabanında analizler yapılmıştır. Taşıt titreşim modelinin doğrusal hareket denklemleri, taşıt sürücü koltuğunun RMS ivme verileri gibi zaman serisi yanıtlarını elde etmek için Runge-Kutta zaman adımı entegrasyonu ile çözülmüştür. Böylece, taşıt sürücü koltuğunun frekans ağırlıklı RMS ivme verileri, İSG yönetmeliği kapsamında değerlendirilmek için ISO 2631-1'deki frekans ağırlıklı eğrileri kullanılarak elde edilmiştir.

Taşıt süspansiyon sistemindeki yay ve sönüm karakteristiklerinin, sürücü koltuğundaki yay, sönüm ve kütle değerlerinin etkilerini incelemek için 7 farklı taşıt modeli oluşturulmuştur. Bu modeller Tablo 2'de gösterilmiştir. Model 1'de belirli bir taşıtın dizayn parametrelerinin yaklaşık değerleri verilmiştir. Model 2'de ise süspansiyon sisteminin yay sertliği artırılmıştır. Model 3'de taşıt süspansiyon sisteminin sönüm katsayısı artırılmıştır. Model 4'de sürücü koltuğundaki yay katsayısı artırılarak daha sert yay kullanılmıştır. Model 5'de ise taşıt sürücü koltuğundaki sönümleyicinin sönümleme katsayısı azaltılarak daha katı davranışlı duruma getirilmiştir. Model 6'da ise taşıt sürücü koltuğunun kütlesi artırılarak koltuğun doğal frekansında düşüşe gidilmiştir. Model 7'de ise ilk 6 modeldeki etkiler incelenerek ideal Model oluşturulmaya çalışılmıştır.

Tablo 2. Farklı dizayn parametrelerini içeren taşıt modelleri.

Taşıt Modelleri	Taşıt Dizayn Parametreleri				
	k_2 [N/m]	c_2 [Ns/m]	k_3 [N/m]	c_3 [Ns/m]	m_3 [kg]
Model 1	300000	20000	25000	1000	137
Model 2	350000	20000	25000	1000	137
Model 3	300000	24000	25000	1000	137
Model 4	300000	20000	35000	1000	137
Model 5	300000	20000	25000	600	137
Model 6	300000	20000	25000	1000	156
Model 7	270000	20000	25000	1400	167

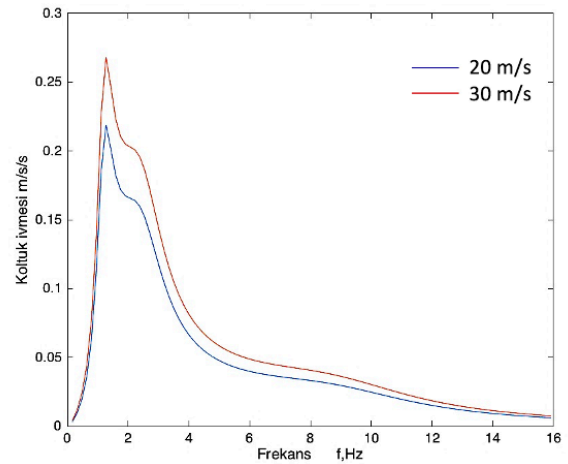
İSG kapsamında “Çalışanların Titreşimle İlgili Risklerden Korunmalarına Dair Yönetmelik” kriterlerine göre yol pürüzlülüğü ve farklı taşıt parametrelerine sahip taşıt modellerinin değerlendirilmesi yapılmıştır. Farklı yol pürüzlülüklerine maruz kalan 7 farklı taşıt modelinin simülasyon sonuçları elde edilmiştir. Bu sonuçlar frekans ağırlıklı sürücü koltuğu RMS ivme değerleri olarak Tablo 3’de verilmiştir. İSG yönetmeliğine bağlı olarak, sürücünün maruz kaldığı koltuk titreşimlerinin RMS ivmelerinin 1.15 m/s^2 ’den yüksek olması rahatsız sürüş olarak tanımlanmaktadır ve meslek hastalıklarına neden olabilmektedir [6]. Sürücü koltuk titreşimlerinin RMS ivme değerlerinin 1.15 m/s^2

değerini geçtiği çalışma şartları kırmızı dolgu ile gösterilmiştir. Bu bölgeler İSG yönetmeliği açısından taşıt sürücüsü olarak çalışan meslek gruplarında tehlikeli bölgeler olarak algılanmaktadır. Bu bölgelerde uzun süre araç kullanan çalışanlarda titreşim kaynaklı mesleki hastalıkların görülme ihtimali oldukça fazladır. Tablo 3’deki mavi dolgulu bölgeler ise güvenli sürüş bölgesini temsil etmektedir. İSG mevzuatı açısından 0.5 m/s^2 değerinden daha yüksek RMS ivme değerine maruz kalındığında ise gerekli önlemlerin alınması gerekmektedir. Tablo 3’de 0.5 m/s^2 değerini geçen fakat 1.15 m/s^2 değerinin altında kalan sürüş bölgeleri sarı dolgular ile gösterilmiştir.

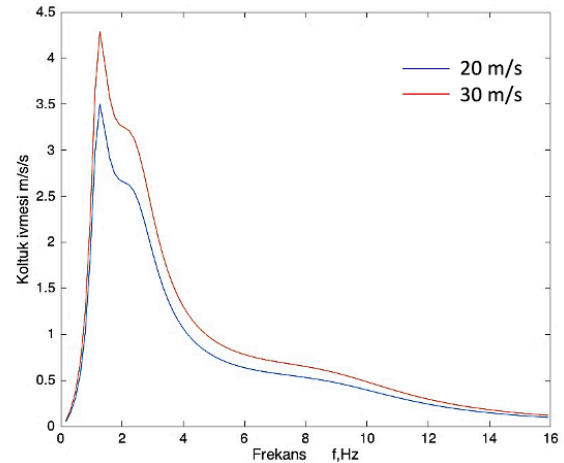
Tablo 3. Frekans ağırlıklı sürücü koltuğu RMS ivme değerleri

Yol Tipi	Taşıt Modelleri						
	Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5	Model 6	Model 7
Beton	0.25	0.43	0.21	0.44	0.51	0.19	0.13
Asfalt	0.57	0.64	0.48	0.71	0.83	0.52	0.36
Parke	0.82	1.17	0.73	1.08	1.19	0.77	0.54
Toprak	1.28	1.41	1.17	1.54	1.73	1.11	0.81
Stabilize	1.33	1.52	1.23	1.72	1.89	1.19	0.95

Model 1’de toprak ve stabilize yolda maruziyet sınır değerine ulaşılrken (1.15 m/s^2), Model 2’de ise parke yolda da bu değere ulaşılmıştır. Model 3 ve 4’de görüldüğü gibi taşıt düzyanındaki süspansiyon sönüm ve koltuk yay karakteristiklerinin değişimi ivme değerlerini etkilese de Model 1’e benzer şekilde toprak ve stabilize yolda maruziyet sınır değerleri geçilmiştir. Model 6’da ise taşıt sürücü koltuğunun artması taşıt sürücü koltuk titreşimlerinin sönümlemesine olumlu bir katkıda bulunmuştur ve sadece stabilize yolda maruziyet sınır değerini geçmiştir. Tüm bu dizayn parametrelerinin etkileri incelenerek, taşıt süspansiyon sistemindeki yay sertliğinin daha düşük, koltuk sönüm değerinin daha yüksek ve koltuk kütlelerinin daha fazla olduğu Model 7 oluşturulmuştur. Model 7’de ise tüm yol şartlarında taşıt sürücüsü maruziyet sınır değerinin altında kalmıştır. Böylece taşıt sürücülerini açısından İSG yönetmeliğine uygun olarak güvenli sürüş tüm yol tiplerinde (beton, asfalt, parke, toprak, stabilize) sağlanmıştır.



Şekil 9. Beton yol için frekans tabanında koltuk ivmesi



Şekil 10. Stabilize yol için frekans tabanında koltuk ivmesi

Beton tipi düşük yol pürüzlülüğüne sahip bir yolda, taşıt hızının iki farklı değere sahip olduğu senaryo için (20 ve 30 m/s) taşıt titreşim modelinin analizleri yapılmıştır ve elde edilen koltuk ivme değerleri gözlenmiştir. Yapılan analizlerde beton tipi çok iyi bir yol ile stabilize yol pürüzlülüğüne maruz kalan taşıtın koltuk ivme değerleri incelenmiştir. Şekil 9'da beton yol için farklı frekans değerlerine karşılık gelen koltuk ivmesi eğrisi gösterilmiştir. Bu eğrilerde, koltuk ve gövde için doğal frekansların etkili olduğu görülmüş, aks gövdesi için ise çok az eğrilik olduğu gözlenmiştir. Şekil 9 ve 10'da görüldüğü gibi ivme genlik değerlerinin lokal tepe noktaları, taşıt koltuğu için 2.51 Hz ve taşıt gövdesi için 1.28 Hz doğal frekanslarında gözlenmektedir. Taşıt aks gövdesinin ise doğal frekansı 9.81 Hz değerinde az eğrilik oluşturarak ortaya çıkmaktadır. Yüksek hızda taşıtın koltuk ivmesinin daha yüksek olduğu görülmüştür. Şekil 10'da ise aynı analizler stabilize yol pürüzlülüğüne maruz kalan taşıt için yapılmıştır. Bu durumda, koltuk ivmesi değerlerinin beton yol analizinin sonuçlarından daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Ayrıca, taşıt hızının artmasıyla koltuk ivme değerlerindeki artışın stabilize yolda da gözlemlendiği görülmüştür.

Sonuç olarak, yolun tipi ve pürüzlülüğü ile taşıt hızının koltuk ivme değerlerine etkisinin önemli olduğu sonucuna varılmıştır. Bu analizler, taşıt titreşimlerinin yol koşullarına bağlı olarak nasıl değiştiğini anlamak ve tasarım veya güvenlik önlemlerini optimize etmek için önemli veriler sunmaktadır.

V. SONUÇLAR

Çalışma kapsamında üç serbestlik dereceli taşıt titreşim modeli teorik olarak oluşturulup, bu modele deneysel olarak elde edilen 5 farklı (beton, asfalt, parke, toprak, stabilize) yol pürüzlülüğü uygulanmıştır. Bu çalışma gerçek bir taşıt ile yapılmamıştır çünkü taşıt dizayn parametrelerindeki değişimin etkisi net olarak gözlemlenememektedir. Bunun yerine, incelemeler taşıt matematiksel modeli üzerinde gözlemlenmiştir. Taşıt dizayn parametrelerinin etkilerini detaylı olarak gözlemlenmesi ve İSG yönetmeliğine uygun maruziyet sınır değerini ($1.15 m/s^2$) geçmeyecek taşıt modeli elde edilmesi amaçlanmıştır. Böylece tüm vücut titreşimine maruz kalma kaynaklı doğacak meslek hastalıklarının önüne geçmek amaçlanmıştır. Çalışmadan elde edilen gözlemlere dayanarak aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- Yol pürüzlülüğünün artması (beton yoldan stabilize yola geçiş) taşıt sürücü koltuğundaki titreşimlerin RMS ivme değerlerini arttırmıştır ve maruziyet sınır değerini geçmesine neden olmuştur.
- Taşıt süspansiyonundaki yay sertliğinin artması konforsuz sürüşe neden olmuştur.

- Süspansiyondaki sönüm değerinin artması frekans ağırlıklı sürücü koltuğu RMS ivme değerlerini azaltarak sürücü açısından olumlu etki sağlamıştır.
- Koltuk yay sertliğindeki artış ve sönüm değerindeki azalış, frekans ağırlıklı sürücü koltuğu RMS ivme değerlerini arttırarak İSG yönetmeliğine göre maruziyet sınır değerinin geçilmesine neden olmuştur.
- Koltuk kütlelerinin artması ivme değerlerini azaltarak güvenli sürüş sağlamıştır.
- Taşıt hızındaki artış frekans tabanında verilen koltuk ivme değerlerinin genliklerinde artışa neden olmuştur.

Sonuç olarak İSG mevzuatı kapsamında verilen maruziyet sınır değerini geçmemek ve sağlıklı iş ortamı sağlanabilmesi için taşıt süspansiyonunun sönüm değerinde, koltuk sönümlenme değerinde ve koltuk kütlelerinde artışa gidilmelidir. Ayrıca, taşıt süspansiyonunun yay sertliği azaltılmalıdır.

İş sağlığı ve güvenliğine uygun olarak titreşimin taşıt sürücüsü üzerindeki etkilerini azaltmak için aşağıdaki önlemler alınabilir;

- Taşıt hızının sınırlandırılması
- Sürücünün ağırlığına göre doğru şekilde ayarlanmış uygun bir süspansiyonlu koltuk sağlanması
- Sürücü koltuğunun sönümleyiciler ile donatılması
- Yeterli dolgu sağlayan ergonomik tasarımlı koltuk ve arkalıkların kullanılması

Uygun gerçek taşıt test ortamı sağlanırsa yapılan bu çalışmalar gerçek bir taşıt üzerinde de yapılabilir. Hidropuls deney sistemi ile gerçek bir taşıta yol pürüzlülüğü girdileri sağlanarak, taşıt farklı yol tiplerinde koşuturulabilir. Sonuç olarak koltuktan üç eksenli ivme ölçer ile veriler toplanarak çalışmanın deneysel analizleri gerçekleştirilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Griffin, M. J., The evaluation of vehicle vibration and seats. *Applied ergonomics*, 9(1), 15-21, (1978).
- [2] Hacibektasoglu, S. E., Mertoglu, B., & Tozan, H., Application of a novel hybrid f-sc risk analysis method in the paint industry. *Sustainability*, 13(24), 13605, (2021).
- [3] Hacibektaşoğlu, S. E., Mertoğlu, B. & Tozan, H., Bulanık çok kriterli karar verme yöntemleriyle bir risk analizi uygulaması. *International Journal of Advances in Engineering and Pure Sciences*, 34 (3), 403-414, (2022).
- [4] Zorlutuna, A. & Kılıç, H. S., İnşaat sektöründeki ergonomik risklerin değerlendirilmesi ve bir uygulama. *International Journal of Advances in Engineering and Pure Sciences*, 34 (1), 14-26, (2022).
- [5] Doğan, O., madencilik faaliyetlerinde gürültü ve titreşim seviyelerinin iş sağlığı ve güvenliği açısından değerlendirilmesi: örnek bir uygulama.

- Social Sciences Studies Journal*, 9(114), 7731-7738, (2023).
- [6] Çetinkaya, F., & Baykent, G., İşyeri çalışma ortamı koşullarının ergonomik yönden incelenmesi (Örnek: Şekerleme Firması). *Uşak Üniversitesi Fen ve Doğa Bilimleri Dergisi*, 1(1), 15-31, (2017).
- [7] Oral, T. Y., & Bekman, F. B., İnsan sağlığı hizmetleri çalışanlarının maruz kaldığı meslek hastalığı etkenlerinin iş sağlığı ve güvenliği kapsamında incelenmesi. *Genel Sağlık Bilimleri Dergisi*, 3(2), 160-178, (2021).
- [8] Doğan, T., Erdem, B., & Duran, Z., Oturma pozisyonunda çalışanların tüm vücut titreşimi maruziyetlerinin belirlenmesinde kullanılan iso2631-1, iso2631-5, bs6841 ve avrupa birliği direktifi (eu) 2002/44/ec'nin karşılaştırılması. *Ergonomi*, 3(2), 108-117, (2020).
- [9] Arıtan, A. E., & Tümer, M., Doğaltaş ocaklarında martopikör kullanımında el-kol titreşim maruziyetinin incelenmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 33(4), 57-66, (2018).
- [10] Arıtan, A. E., & Tümer, M., Doğaltaş ocaklarında ekskavatör operatörlerinin tüm vücut titreşim maruziyetinin incelenmesi. *Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 7(2), 321-330, (2019).
- [11] Lorente-Pedreille, R. M., Brocal, F., Saenz-Nuño, M. A., & Sebastián, M. A., Analysis of metrological requirements in occupational health and safety regulations related to the emerging risk of exposure to vibrations. *Applied Sciences*, 10(21), 7765, (2020).
- [12] Çalışanların Titreşimle İlgili Risklerden Korunmalarına Dair Yönetmelik, *Official Gazette* 28743 (22 August 2013), md. 5/1.
- [13] Kolich, M., & Taboun, S. M., Ergonomics modelling and evaluation of automobile seat comfort. *Ergonomics*, 47(8), 841-863, (2004).
- [14] Da Silva, M. G., Measurements of comfort in vehicles. *Measurement Science and Technology*, 13(6), R41, (2002).
- [15] Corbridge, C., Griffin, M. J., & Harborough, P. R., Seat dynamics and passenger comfort. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 203(1), 57-64, (1989).
- [16] Guney, A., Taşıtlarda Titreşim ve Gürültü, *Lecture Notes*, İTÜ, İstanbul, 3-10, (1992).
- [17] Du, H., Li, W., & Zhang, N., Vibration control of vehicle seat integrating with chassis suspension and driver body model. *Advances in Structural Engineering*, 16(1), 1-9, (2013).
- [18] Uhl, T., Chudzikiewicz, A., & Karpiński, J., Dynamic problems in rail vehicle design. *Archives of Transport*, 12, 57-71, (2000).
- [19] Koziak, S., Chudzikiewicz, A., Opala, M., & Melnik, R., Virtual software testing and certification of railway vehicle from the point of view of their dynamics. *Transportation Research Procedia*, 40, 729-736, (2019).
- [20] Lovska, A., & Fomin, O. A new fastener to ensure the reliability of a passenger car body on a train ferry. *Acta Polytechnica*, 60(6), (2020).
- [21] Lovska, A., Fomin, O., Horban, A., Radkevych, V., Skok, P., & Skliarenko, I., Investigation of the dynamic loading of a body of passenger cars during transportation by rail ferry. *Eureka: physics and engineering*, (4), 91-100, (2019).
- [22] Gillespie, T. D., Heavy Truck Ride, University of Michigan Transportation Research Institute, *SAE SP-607*, Ann Arbor, Michigan, (1985).
- [23] Karen, İ., Kaya, N., Öztürk, F., Korkmaz, İ., Yıldızhan, M., & Yurttaş, A., A design tool to evaluate the vehicle ride comfort characteristics: modeling, physical testing, and analysis. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 60(5-8), 755-763, (2012).
- [24] Dragan, S., & Vlastimir, D., The effect of stiffness and damping of the suspension system elements on the optimization of the vibrational behaviour of a bus. *International Journal for Traffic and Transport Engineering*, 1(4), 231-244, (2011).
- [25] Yay, K., & Ereke, İ. M., Hızlandırılmış taşıt ömür testlerinde yol verisi kullanımına yeni bir yaklaşım. *İTÜDERGİSİ/d*, 2(5), (2010).
- [26] Pavic, A., & Reynolds, P., Vibration serviceability of long-span concrete building floors. Part 1: Review of background information. *Shock and Vibration Digest*, 34(3), 191-211, (2002).
- [27] Yavuz, A., & Guney, A., optimization of suspension characteristics for increasing expected daily exposure durations in vehicles according to ISO 2631-1 standard using genetic algorithms. *In INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, 259(3), 6225-6234, (2019).
- [28] Zhu, Q., & Ishitobi, M., Chaotic vibration of a nonlinear full-vehicle model. *International Journal of Solids and Structures*, 43(3-4), 747-759, (2006).
- [29] Robert, F., The Dynamics of Vehicles on Roads and on Tracks, Swets Zeitlinger, Lisse, The Netherlands, (2000).
- [30] ISO-2631-1 Mechanical Vibration and Shock-Evaluation of Human Exposure to Whole Body Vibration Part 1: General Requirements, International Organization for Standardization, Switzerland, (1997).