



PARÇACIK DARBESİ İLE TİTREŞİM SÖNÜMLEME ÜZERİNE BİR ÇALIŞMA

¹Osman YİĞİD , ²Orhan ÇAKAR 

¹Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Elazığ, TÜRKİYE

^{1,2}Bitlis Eren Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Bitlis, TÜRKİYE

¹oyigid@firat.edu.tr, ²cakaro@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 24.09.2019; Kabul/Accepted in Revised Form: 01.11.2019)

ÖZ: Parçacık darbesi ile sönümleme, ana yapı üzerindeki boşluk veya boşluklara çok sayıda küçük boyutlu parçacıklar yerleştirilerek sistemdeki titreşim enerjisinin azaltıldığı pasif bir sönümleme yöntemidir. Titreşimi azaltılacak sistem üzerinde oluşturulan hücreler içine yerleştirilen çok sayıda küçük taneli parçacıklar titreşim esnasında hareket ederler ve hücre içerisinde birbirlerine ve hücre duvarlarına çarparlar. Bu sayede ana sistemin titreşimini bir miktar sönümlerler. Bu çalışmada, yatay doğrultuda zeminden tahrikli tek serbestlik dereceli bir yapının titreşim seviyesinin düşürülmesinde parçacık darbesi ile sönümleyicinin performansı incelenmiştir. Ana yapı üzerine açılan hücreler içerisine çok sayıda küresel parçacıklar yerleştirilmiştir. Parçacıkların birbiri ve hücre duvarları ile olan dinamik etkileşimini modellemek için Ayrık Elemanlar Yöntemi kullanılmış ve parçacık sayısına bağlı olarak çok sayıda doğrusal olmayan denklem takımı elde edilmiştir. Bu denklemlerin sayısal olarak çözülmesiyle sistemin zamana bağlı olarak titreşim genlikleri ve her parçacığın hücre içerisindeki hareketi elde edilmiştir. Yapılan sayısal uygulamalarda parçacıkların ana sistemin titreşimlerini önemli ölçüde sönümlediği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Parçacık darbe sönümleme, Ayrık Elemanlar Yöntemi, Hertz temas teorisi

A Study On Particle Impact Damping

ABSTRACT: Particle impact damping is a passive damping method in which the vibration energy in the system is attenuated by placing multiple small size particles into the cavity on the main structure. A large number of small particles, placed into the cells formed on the system where vibration reduction desired, move during vibration and collide with each other and cell walls. Thus, they absorb the vibration of the main system to some extent. In this study, the performance of particle impact damper to decrease the vibration level of a single degree of freedom system excited from the ground in horizontal direction was investigated. A large number of spherical particles are placed into the cells. The Discrete Elements Method was used to model the dynamic interaction of particles with each other and cell walls, and depending on the number of particles a set of nonlinear equations was obtained. By the numerical solution of these equations, the vibration amplitudes of the system and the movement of each particle within the cell are obtained. In the numerical applications, it has been observed that the particles significantly attenuate the vibration of the main system.

Key Words: Particle impact damping, Discrete Element Method, Hertz contact theory

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Darbe ile sönümleme yöntemi pasif titreşim kontrol tekniğidir. Bu teknikle sistemdeki titreşim enerjisi çarpma ve sürtünme yoluyla ısı, elastik dalga, ses vb. olarak dağıtılır (Ahmad ve diğ., 2017).

Darbe ile sönümleme tekniği, ya sönümleyici kütle yerleştirilmiş taşıyıcı muhafazanın ana yapıya monte edilmesiyle ya da ana yapı üzerinde uygun delik açılarak yerleştirilmesiyle elde edilir (Xu ve diğ., 2004, 2005). Geleneksel olarak, bu teknikte tek bir katı küresel kütle yerleştirildiği boşluk içerisinde hareket eder. Kütle oranı, açıklık, malzeme, parçacık boyutu, tahrik titreşiminin frekansı ve genliği gibi parametreler incelenerek bu yöntemin hem teorik hem de deneysel olarak yapısal tepki üzerindeki etkisi kapsamlı bir şekilde çalışılmıştır (Duncan ve diğ., 2005; Masri 1970; Masri ve Gaughey 1964; Vinayaravi ve diğ., 2013). Böyle bir sistemde çarpma kuvveti çok büyüktür ve yüzey aşınmasının yanı sıra sistemde şok ve gürültüye sebep olmaktadır.

Birden çok, küçük boyutlu ve yumuşak taneciklerin kullanılması çarpma yükünü ve yapı üzerindeki istenmeyen etkileri azaltabilir. Bu şekilde modifiye edilmiş yönteme parçacık darbesi ile sönümleme (PDS) denir. PDS kurulumu kolay, çevreye duyarız, düşük maliyetli ve geniş sıcaklık ve frekans bant aralığında etkilidir ve en önemlisi sistemin yapısal özelliklerini çok az değiştirmektedir. Viskoz damperlerin özellikle yüksek ve düşük sıcaklıklarda farklı özellik göstermelerinden dolayı bu yönüyle özellikle zor şartlar altındaki geleneksel viskoz ve viskoelastik damperlerin yerini alabilir. Parçacık darbesi ile sönümleyiciler binalarda rüzgâra ve depreme karşı (Lu ve diğ., 2012), türbin kanatlarında, takım tezgâhlarında, uzay mekiklerinde, uzay yapılarında titreşimin azaltılmasında başarılı bir şekilde uygulanmıştır (Ahmad ve diğ., 2016; Knight ve diğ., 2013; Moore ve diğ., 1995; Yao ve Chen 2015).

Bal peteği gibi hücreli sandviç yapılar hafif ve doğası gereği düşük sönümleme kabiliyetine sahip ve parçacık darbe sönümleme tekniğinin uygulanması için çok uygun ortam sunmaktadır. Son zamanlarda bal peteği sandviç panellerinin boş hücrelerinin içerisine sönümleyici parçacıklar eklenerek sönümleme performansının iyileştirilebilir olduğu gözlenmiştir (Hagop Panossian 2005; Michon ve diğ., 2013; Panossian ve Ehr Gott 2007; Wang ve Yang 2000). Sönümleyici parçacıklarla doldurulmuş bal peteği sandviç panellerinin sönüm ve tepki davranışıyla alakalı literatürde çok az çalışma vardır. (Wang ve Yang 2000) lehim toplarıyla doldurulmuş levhalı bal peteğini deneysel olarak analiz etmişlerdir. Hücre duvarlarına ve yapışma yüzeylerine zarar vermeden sistemin tepkisinin azaldığını gözlemlemişlerdir. (Michon ve diğ., 2013) viskoelastik toplarla doldurulmuş ankastre yapının sönümleme karakteristiği üzerindeki etkisini incelemişler ve deneysel olarak eşdeğer dinamik titreşim yapan sistemin parametrelerini elde etmişlerdir. (Koch ve diğ., 2017) araç karterinin en çok titreşim yapan kısmını bal peteği sandviç panellerinden imal edip içerisine farklı boyutlarda ve miktarlarda kum tanecikleri yerleştirip titreşim ve ses sönümlemesini başarılı şekilde uygulamışlardır. (Ahmad ve diğ., 2017) uç kısımları doldurulmuş ankastre yapının tepki davranışını ayrı elemanlar metodu yardımıyla incelemişlerdir. Parçacıkların birbiriyle ve hücre duvarıyla olan etkileşimini modelleyip deneysel ve matematiksel modelin yakın uyumlu olduğunu tespit etmişlerdir.

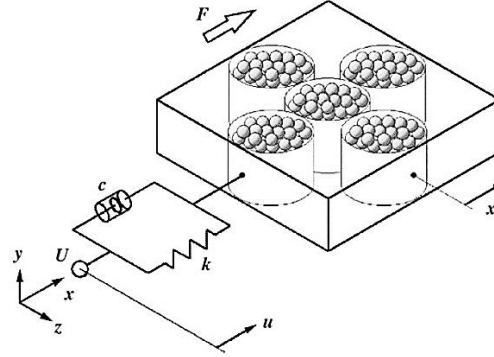
PDS'de enerji yitimi oldukça nonlineer ve ağırlıklı olarak ana yapının parametrelerine bağlıdır. Parçacıkların boyutu, şekli, sayısı, malzemesi, açıklığın geometrisi ve malzemesi, kütle oranı, yapısal moda nispeten PDS'nin konumu ve tahrik kuvvetinin frekansı sistemin yapısını önemli ölçüde etkilemektedir.

Bu çalışmada, yatay doğrultuda hareket edebilen zeminden tahrikli bir yapıya eklenen belirli sayıdaki parçacıkların hareketi modellenmiş ve parçacıkların ana sistemin titreşimini sönümleme etkisi incelenmiştir. Aşağıdaki bölümlerde PDS'nin ve modellemede kullanılan yöntemin teorisi verildikten sonra yöntemin geçerliliği sayısal uygulama ile gösterilmiştir.

PARÇACIK TİTREŞİM SÖNÜMLEYİCİ (PARTICLE IMPACT DAMPER)

Örnek bir parçacık titreşim sönümleme sisteminin basit bir modeli Şekil 1'de gösterilmiştir. Üzerinde silindirik boşluklar olan ve kütlesi M olan prizmatik ana yapı bir k yayı ve c sönüm elmanı ile mesnetlenmiştir. Ana yapı sadece x doğrultusunda hareket edecek şekilde sınırlandırılmış ve U mesnet noktasının harmonik olarak tahrik edildiği kabul edilmiştir. Ana yapı üzerindeki silindirik boşluğun yarıçapı R ve yüksekliği H 'dir. Parçacık sönümleyicilerin verimliliği, parçacıkların büyüklüğüne ve sayısına bağlıdır. Parçacıklar genellikle yüksek yoğunluğa sahip küresel malzemelerden ve yarıçapı boşluk yarıçapının $1/5$ 'inden küçük olacak şekilde seçilir. Titreşim hareketi esnasında parçacıkların

hücre duvarlarıyla çarpışması momentum değişimine sebep olur. Böylece ana yapının titreşim genliği azalır.



Şekil 1. Parçacık darbe sönümleyici modeli (Saeki 2005)

Figure 1. Model of particle impact damper (Saeki 2005)

AYRIK ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE SİSTEMİN MODELLENMESİ (MODELING SYSTEM WITH DISCRETE ELEMENT METHODS)

Ana yapı ile birlikte parçacıkların hareketini zamana bağlı olarak belirleyebilmek için Ayrık Elemanlar Yöntemi (AEY) kullanılacaktır. Bu yöntem tanecikli malzemelerin davranışını simüle etmek için (Cundall ve Strack 1979) tarafından geliştirilmiş bir tekniktir. Sistemdeki her parçacık-parçacık ve parçacık-yapı temasının tespit edildiği, farklı yükler ve sınır şartları altındaki parçacıkların dinamik davranışını analiz etmek için kullanılan sayısal bir yöntemdir. Çok küçük zaman diliminde, parçacıklar arasında temas kaybı ve yeni temas oluşumu gerçekleşir. İki parçacık temasından kaynaklanan temas kuvvetleri, temas kuvvet modeline dayanarak hesaplanır. AEY, özellikle parçacık titreşim sönümleme problemi için uygun bir yöntemdir. Birçok araştırmacı AEY'ni parçacık sönümleme problemlerini analiz etmek için kullanmıştır. (Saeki 2002, 2005) harmonik tahrik edilen tek serbestlik dereceli sistemin parçacık sönümleme performansını incelemiş ve AEY ile deneysel çalışmaların uyum içerisinde olduğunu bildirmiştir. (Wong ve diğ., 2009), (Mao ve diğ., 2004), parçacık sönümlemesindeki enerji yitimini tahmin etmek için AEY'yi kullanmışlar ve deneysel olarak doğrulamışlardır. (Lu ve diğ., 2010) AEY'yi kullanarak rastgele yükler altındaki yatay ve dikey titreşim hareketi yapan tek ve çok serbestlik dereceli yapının performansına ilişkin parametrik çalışmalar yürütmüştür.

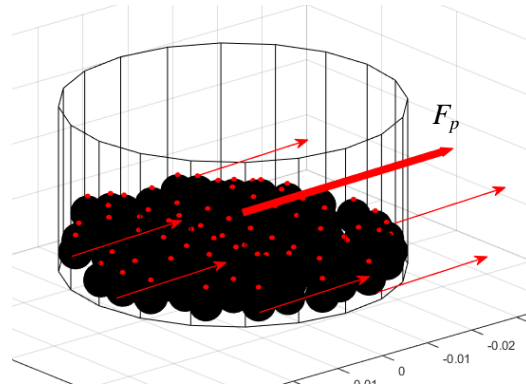
Sistemin hareket denklemlerinin elde edilmesi (Obtaining the Equations of Motions of the System)

Şekil 1'de gösterilen tek serbestlik dereceli olarak modellenen sistemin sadece x doğrultusunda hareket ettiği varsayılırsa hareket denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$M\ddot{x} + c(\dot{x} - \dot{u}) + k(x - u) = F_p$$

$$u = b \sin(\omega t)$$
(1)

Burada x ana yapının üst kısmının konumunu, u destek noktasının konumunu göstermektedir. $\{\cdot\}$ ve $\{\ddot{\cdot}\}$ zamana göre 1. ve 2. mertebeden türevleri ifade etmektedir. b sarsıcının genliği, ω frekansı ve t ise zamandır. F_p parçacıkların, t anında yapının yüzeyleri ile temasından kaynaklanan kuvvetin titreşim doğrultusundaki bileşenlerinin toplamı olarak düşünülebilir (Şekil 2).



Şekil 2. Parçacıkların hücre duvarları ile temasından kaynaklanan darbe sönüm kuvveti

Figure 2. Impact damping force caused by contact of particles with cell walls

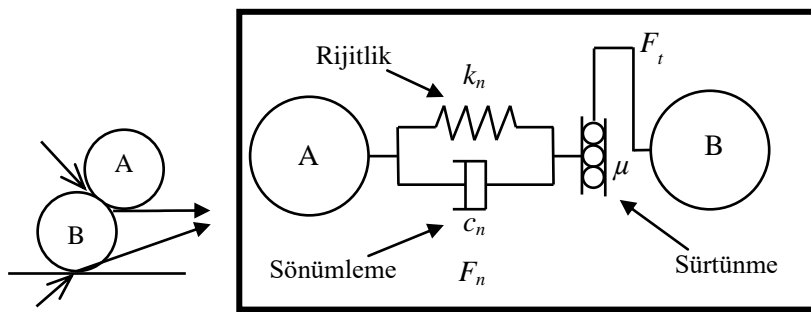
Ana sistemin hareketini ayrıntılı olarak analiz etmek için tüm parçacıkların hareketi dikkate alınmalıdır. Bir i parçacığının üç boyutlu uzaydaki hareketi, yer çekim etkisi g de dikkate alınarak aşağıdaki denklemlerle ifade edilebilir:

$$\begin{aligned} m\ddot{\mathbf{p}}_i &= \mathbf{F}_i - mg \\ I\ddot{\boldsymbol{\varphi}}_i &= \mathbf{T}_i \end{aligned} \quad (2)$$

Burada kalın harfler vektörleri göstermektedir. m ve I parçacığın kütlesi ve atalet momenti, \mathbf{p} ve $\boldsymbol{\varphi}$ parçacığın doğrusal ve açısal konumları, \mathbf{F}_i parçacık üzerine etki eden temas kuvvetlerinin toplamı ve \mathbf{T}_i temas kuvvetlerinden kaynaklanan momentlerin toplamını ifade etmektedir. Bu parametrelerin hesaplanması bir sonraki bölümde ayrıntılı açıklanacaktır.

Tanecikli parçacıkların davranışının sönümleme verimliliği üzerindeki etkisi denklem (1) ve (2)'nin aynı anda çözülmesi ile analiz edilebilir. Ancak zaman adımı çok küçük olduğundan oldukça fazla hesaplama süresi gerekmektedir.

Temas Kuvvetleri (Contact Forces)



Şekil 3. Çarpışma dinamiği ve oluşan kuvvetler.

Figure 3. Contact dynamics and forces

İki parçacığın çarpışması esnasında ortaya çıkan kuvvetler normal ve teğetsel kuvvetler olarak iki bileşene ayrılır (Şekil 3). Normal kuvvetler parçacıklarda ötelemeye, teğetsel kuvvetler ise açısal dönmeye sebep olmaktadır. Temas kuvvetinin normal bileşeni, Hertz temas teorisine dayanan yay kuvveti ve sönümleme kuvveti ile modellenmiştir (Tsuji ve diğ., 1992). Teğetsel kuvvet ise Coulomb sürtünme kuvveti olarak modellenmiştir. Parçacıkların birbirine yapışmadığı varsayımıyla bu kuvvetler aşağıdaki formüllerle hesaplanabilir.

$$\mathbf{F}_n = \left(k_n \delta^{\frac{3}{2}} + c_n \delta^{\frac{1}{4}} \dot{\delta}^n \right) \vec{n} \quad (3)$$

$$\mathbf{F}_t = -\mu \mathbf{F}_n \frac{\delta^t}{|\delta^t|} \quad (4)$$

Burada; \mathbf{F}_n normal doğrultuda oluşan kuvvet, k_n Hertz yay sabiti, δ girinti miktarı, c_n sönüm sabiti, δ^n parçacıkların bağıl hızının normal vektöre izdüşümü ve δ^t bağıl hızın teğetsel hız vektörüdür. \vec{n} B parçacığının merkezinden A parçacığının merkezine doğru olan birim vektör, μ sürtünme katsayısını ifade etmektedir.

Hertz yay sabiti (k_n) iki küresel parça ve küresel parça-düz duvar için aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$k_n = \frac{4}{3} \sqrt{r_{e\delta}} * E_{e\delta} \quad (5)$$

Burada; $r_{e\delta}$ eşdeğer yarıçap ve $E_{e\delta}$ eşdeğer elastisite modülü olup aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$r_{e\delta} = \frac{r_A * r_B}{r_A + r_B} \quad (6)$$

$$E_{e\delta} = \frac{E_A E_B}{(1 - \nu_A^2) E_B + (1 - \nu_B^2) E_A}$$

Düz bir duvarla temas halinde ise bu ifadeler:

$$r_{e\delta} = r_A \quad (7)$$

$$E_{e\delta} = \frac{E_A E_0}{(1 - \nu_A^2) E_0 + (1 - \nu_0^2) E_A}$$

olarak tanımlanır. Burada ν Poisson oranıdır ve alt indis 0 duvarı simgelemektedir. $R/r > 0.02m$ olması halinde yukarıdaki denklem silindirik duvarlar için de geçerlidir (Saeki 2005). c_n sönüm sabiti denklem (8) ile hesaplanır.

$$c_n = \alpha \sqrt{m_{e\delta} k_n} \quad (8)$$

Burada $m_{e\delta}$ eşdeğer kütle olup aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$m_{e\delta} = \frac{m_A m_B}{m_A + m_B} \quad (9)$$

α ise çarpışma sönümleme katsayısı olarak ifade edilir ve restitution (geri getirme/sıçrama) katsayısına (e_n) bağlıdır (Tsuji vd. 1992):

$$\alpha = -\ln(e_n) \sqrt{\frac{5}{\ln(e_n)^2 + \pi^2}} \quad (10)$$

Her bir parçacık aynı anda birden fazla parçacık ve duvarla temas edebilir. i parçacığının n_1 adet parçacık ve n_2 adet hücre duvarları ile temas halinde olduğu durumda parçacığa etkiyen kuvvetler aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\mathbf{F}_i = \sum_{j=1}^{n_1} \mathbf{f}_{ij} + \sum_{w=1}^{n_2} \mathbf{f}_{iw} \quad (11)$$

$$\mathbf{T}_i = \sum_{j=1}^{n_1} \mathbf{r}_i \vec{n}_{ij} \times \mathbf{f}_{ij} + \sum_{w=1}^{n_2} \mathbf{r}_i \vec{n}_{iw} \times \mathbf{f}_{iw} \quad (12)$$

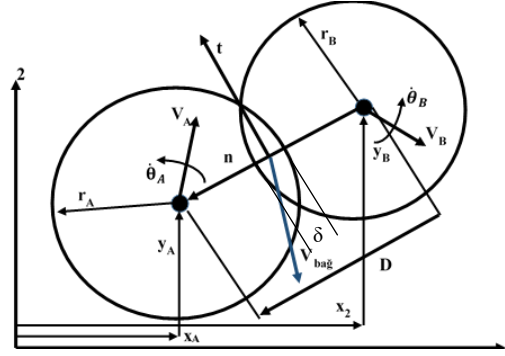
Burada f_{ij} parçacık-parçacık, f_{iw} parçacık-duvar temasından doğan kuvvetleri; n_{ij} parçacık-parçacık merkezleri arasındaki ve n_{iw} temas edilen duvardan parçacık merkezine doğru olan birim vektörü ifade etmektedir.

Denklem (1) deki F_p (11) denkleminin sağ tarafındaki ikinci terimin x yönündeki bileşenidir. Bu kuvvetlerin hesaplanması için önce parçacığın hareketi dikkate alınır. Bu hareket neticesinde oluşan temas ve temas kuvvetleri (3-12) denklemleri kullanılarak hesaplanır. Bu işlem bütün parçacıklar için

tekrarlanır. Ana yapının dinamik davranışı ise (1) ve (2) denklemlerinin zamana göre çözülmesiyle elde edilir.

Parçacıkların teması (Contact of particles)

Şekil 4'te görüldüğü gibi iki parçacık birbirine temas ettiğinde uygulanan kuvvete oranla parçacıklar elastik deformasyona maruz kalırlar. Bir miktar birbiri üzerine binerler. Bu miktar girinti miktarı (δ) olarak adlandırılır.



Şekil 4. İki parçacığın çarpışma modeli

Figure 4. Collision model of two particles.

$$\delta = (r_A + r_B) - |\mathbf{R}_A - \mathbf{R}_B| \quad (13)$$

Burada r parçacıkların yarıçapı ve \mathbf{R} parçacık merkezlerinin konum vektörüdür. Parçacıkların konumu hücre boşluğunun merkezi referans alınarak elde edilir. A parçacığının hızı V_A , B parçacığının hızı V_B olsun. B parçacığının A parçacığına göre bağıl hızı $\mathbf{V}_{B/A} = \mathbf{V}_{bağıl} = \mathbf{V}_B - \mathbf{V}_A$ ile hesaplanır. Bağıl hızın normal ve teğetsel izdüşümünü hesaplamak için skaler çarpım kullanılır.

$$\delta_n = \mathbf{V}_{bağıl} \cdot \vec{n} \quad \text{ve} \quad \delta_t = \mathbf{V}_{bağıl} \cdot \vec{t} \quad (14)$$

Parçacıkların açısal hızları (ω_A, ω_B) da hesaba katılırsa;

$$\delta_t = \mathbf{V}_{bağıl} \cdot \vec{t} - \omega_A r_A + \omega_B r_B \quad (15)$$

ifadesi ile elde edilir. Parçacıkların merkezleri arasındaki normal vektör

$$\vec{n} = \frac{\mathbf{R}_A - \mathbf{R}_B}{|\mathbf{R}_A - \mathbf{R}_B|} \quad (16)$$

ile hesaplanır. Üç boyutlu uzayda bir \vec{n} vektörüne dik sonsuz sayıda teğetsel vektör mevcuttur. Dik vektörlerin skaler çarpımının sıfır olması varsayımından bir adet teğetsel vektör (\vec{t}_1) bulunabilir. İki dik vektörün vektörel çarpımı yine bir dik (\vec{t}_2) vektördür. Böylece gereken iki adet teğetsel vektör bulunabilir.

Parçacıkların hücre yüzeyi ile temasını hesaplayabilmek için yüzey denklemlerine ihtiyaç vardır. Duvarlar üç boyutlu uzayda düzlem denklemiyle ifade edilir.

$$ax + by + cz + d = 0 \quad (17)$$

A parçacığının (x_A, y_A, z_A) duvara olan dik uzaklığı aşağıdaki denklemler ile hesaplanır.

$$d_d = \frac{ax_A + by_A + cz_A + d}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \quad (18)$$

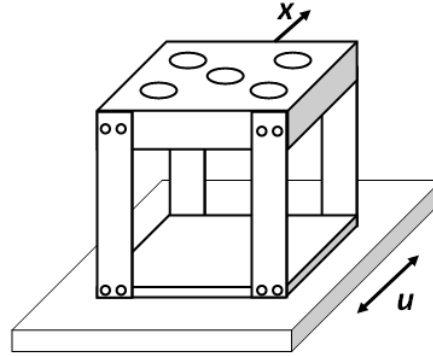
$$d_d = \sqrt{x_A^2 + y_A^2} - R$$

Parçacıkların birbiri veya duvar ile çarpışmasından kaynaklanan kuvvetlerin doğru hesaplanabilmesi ve gerçeğe yakın sonuçlar elde edilebilmesi için zaman aralığının dikkatli seçilmesi gerekir. Zaman aralığının seçiminde Rayleigh Zaman Sabiti formülü ($\Delta t^* = \pi r \sqrt{\frac{\rho}{G}}$) kullanılır. Burada, ρ parçacık yoğunluğu ve G kayma modülüdür. Zaman aralığı bu değer %10 ila %30 arasında bir değer seçilir ($0.1\Delta t^* < \Delta t < 0.3\Delta t^*$).

SAYISAL UYGULAMA (NUMARICAL APPLICATION)

Sayısal uygulama için

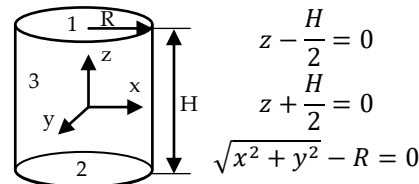
Şekil 5'de gösterilen zeminden tahrikli sistem seçilmiştir. Dört yaprak yay ile desteklenmiş bir kütleden ibaret ana yapı tek serbestlik dereceli bir sistem olarak modellenmiştir. Eşdeğer parametreler $M=1.319$ kg, $c=0.877$ Ns/m ve $k=3493.2$ N/m'dir. Yapı üzerinde sönümleyici parçacıkların yerleştirilmesi için simetrik 5 adet silindirik boşluk bulunmaktadır. Silindirik hücrelerin yarıçapı $R=0.03$ m ve yüksekliği $H=0.03$ m'dir. Ana yapı zeminden harmonik ($b=0.001$ m, $f=8.3$ Hz) olarak tahrik edilmektedir. Parçacıkların yarıçapı $r=0.003$ m'dir.



Şekil 5. Parçacık darbe sönümleyici

Figure 5. Particle impact damper

Parçacıkların malzeme özellikleri Çizelge 1'de verilmiştir. Silindirik boşluğun alt yüzeyi, üst yüzeyi ve yan yüzeylerinin denklemleri sırasıyla aşağıda verilmiştir.



Şekil 6. Silindirik hücre ve yüzey denklemleri

Figure 6. Cylindrical cell and its surface equations

Çizelge 1. Parçacık malzeme özellikleri**Table 1.** Mechanical properties of particles

Toplam Parçacık Sayısı	960
Çap (m)	0.006
Yoğunluk (kg/m ³)	1190
Sürtünme Katsayısı (μ)	0.52
Sönüm Katsayısı (α)	0.077
Yay Katsayısı (N/m ^{3/2})	
Parçacık-Parçacık	1.0x10 ⁷
Parçacık-Duvar	1.3x10 ⁷

Parçacıkların ana yapı ile birlikte hareket denklemlerini çözmek için bir Matlab® programı hazırlanmıştır. Bu programda her bir $\Delta t = 4E-6$ sn adımında denklem (13) ve (18) kullanılarak hem parçacık-parçacık hem de parçacık-duvar teması kontrol edilmiştir. Temas yoksa ara işlemleri yapmadan F_p sıfır olacak şekilde denklem (1) *ode45* fonksiyonu kullanılarak çözülmüştür. Temas olması halinde girinti miktarı, normal ve teğetsel vektörler, bağıl hızın normal ve teğetsel bileşenleri ve (5-12) denklemleri kullanılarak parçacıklara etkiyen kuvvetler ve momentler hesaplanmıştır. Bu ifadeler (F_p) denklem (1)'de yerine yazılarak ana yapının yer değiştirme cevabı x elde edilmiştir. Aynı ifadeler denklem (2)'ye yerleştirilerek parçacıkların konum ve hız ifadeleri elde edilmiştir. Bu işlemler her bir parça için tekrarlanmıştır.

Sayısal çalışmada ilk olarak 192 adet parçacık tek bir boşluğa yerleştirilmiştir. Analiz süresi 16 sn olarak belirlenmiştir. Bu süre zarfında denklem (1) ve (2) eş zamanlı çözülerek ana yapının konum ve hız vektörleri ile her bir parçacığın kinematik parametreleri elde edilmiştir. Şekil 7 parçacıksız ve parçacık sönümlemeli sistemlerin 12-13 sn zaman aralığındaki kararlı durum titreşim genliğini göstermektedir.

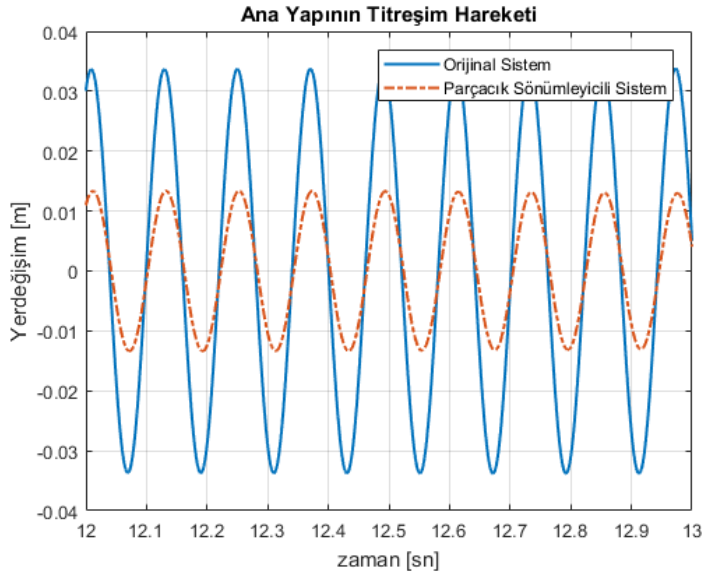
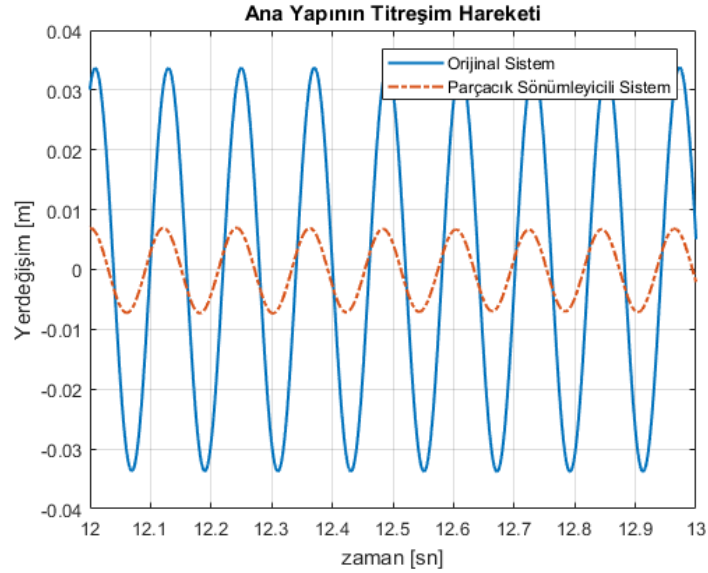
**Şekil 7.** Parçacıksız (-) ve tek hücrede 192 parçacıklı (- -) sistemlerin titreşim cevabı.

Figure 7. Vibration response of systems without particles (-) and with 192 particles in one cell (- -).

İkinci bir uygulama olarak 960 adet aynı özellikteki parçacık 5 adet boşluğa eşit paylaştırılmıştır. Hesaplama süresinin kısaltılması için bütün hücrelerdeki parçacıkların aynı hareketi yaptığı varsayılmıştır. Ana yapının kararlı durum titreşim hareketi Şekil 8'de verilmiştir. Birden fazla hücreye parçacık yerleştirilmesi durumunda titreşim genliğinin daha da azaldığı gözlemlenmiştir.

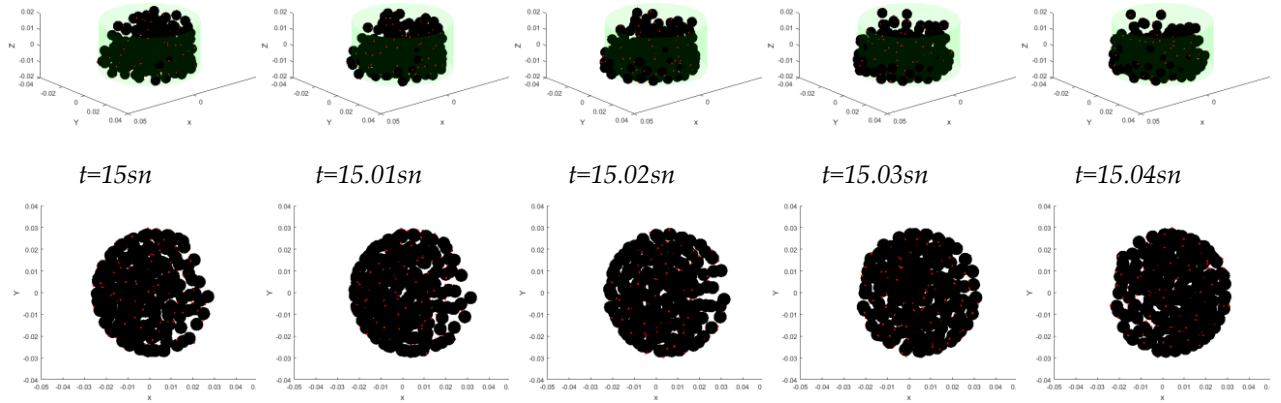
Şekil 9 tanecikli parçacıkların davranışlarını göstermektedir. Üstteki resimler izometrik alttaki resimler ise üstten görünüşü göstermektedir. Zamanla parçacıkların titreşim doğrultusunda hareket ettikleri görülmektedir.



Şekil 8. Parçacıksız (-) ve beş hücrede 960 parçacıklı (--) sistemlerin titreşim cevabı.

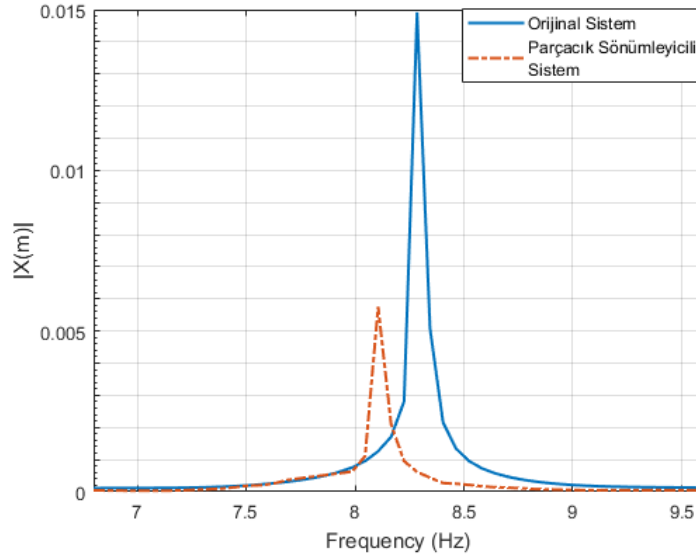
Figure 8. Vibration response of systems without particles (-) and with 960 particles in five cells (--).

Parçacıkların titreşime etkisini daha iyi görebilmek için sistemin hesaplanan titreşim cevabı FFT fonksiyonu yardımıyla hızlı Fourier dönüşümüne tabi tutulmuştur. Şekil 10 tek hücreli ve Şekil 11 beş hücreli parçacıklı ana yapının frekans-titreşim genliklerini göstermektedir. Bu grafiklerde parçacıksız sistemin titreşim genliğinin eklenen parçacıklar sayesinde azaldığı açıkça görülmektedir. Titreşim genliği ile beraber sistemin doğal frekansı da eklenen parçacıklardan dolayı bir miktar azalmıştır.



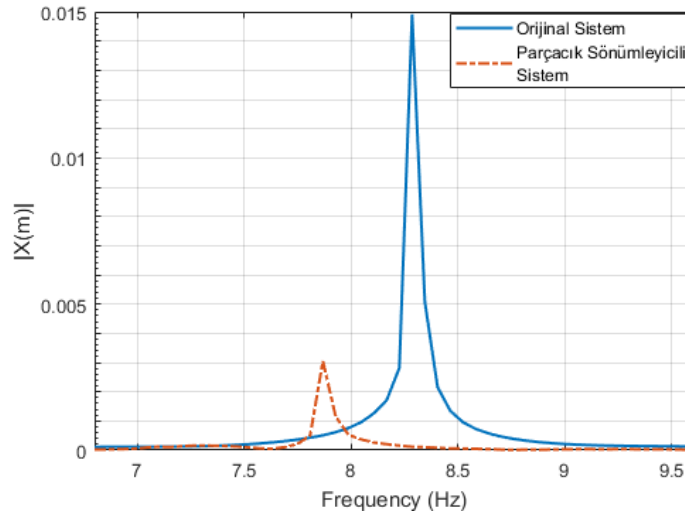
Şekil 9. Parçacıkların 15.00-15.04 sn zaman aralığındaki davranışları

Figure 9. Behavior of particles in the time range of 15.00-15.04 sec.



Şekil 10. Parçacıksız (-) ve tek hücrede 192 parçacıklı (--) sistemlerin frekans-titreşim genlikleri

Figure 10. Frequency-vibration amplitudes of systems without particles (-) and with 192 particles in one cell (--).



Şekil 11. Parçacıksız (-) ve 5 hücrede 960 parçacıklı (--) sistemlerin frekans-titreşim genlikleri

Figure 11. Frequency-vibration amplitudes of systems without particles (-) and with 960 particles in five cells (--).

SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, pasif titreşim sönümleme yöntemlerinden biri olan çoklu parçacık darbesi ile titreşim sönümleme sistemi incelenmiştir. PDS'nin sönümleme performansını incelemek için tek serbestlik dereceli bir yapının üzerine beş tane boş hücre açılmış ve bu hücelere çok sayıda parçacık doldurularak oluşturulan yapının analitik modeli elde edilmiştir. Elde edilen denklemler sayısal olarak çözülerek her bir parçacığın uzaydaki hareketi ve ana yapının titreşim hareketi elde edilmiştir. Parçacıkların sistemin titreşim genliğini önemli miktarda azalttığı gözlemlenmiştir. Bu özelliği PDS'nin titreşim sönümleme amacıyla kullanılabileceğini göstermektedir. Parçacık sayısı, boyutları ve malzemesi ile hücre tipi ve boyutlarının sönüm performansı üzerindeki etkileri ve bunların en iyilemesi sonraki çalışmalar olarak düşünülmüştür.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

Ahmad, N., Ranganath R., Ghosal A., 2016, "Assessment of particle damping device for large laminated

- structures under acoustic excitations", *Proceedings of the 14th ISAMPE National Conference on Composites (INCCOM-14)*, Hyderabad.
- Ahmad, N., Ranganath R., Ghosal A., 2017, "Modeling and experimental study of a honeycomb beam filled with damping particles", *Journal of Sound and Vibration*, Cilt 391, ss. 20–34.
- Cundall, P. A., Strack, O. D. L., 1979, "A discrete numerical model for granular assemblies", *Geotechnique*, Cilt 29, Sayı 1, ss. 47–65.
- Duncan, M. R., Wassgren, C. R., Krousgrill, C. M., 2005, "The damping performance of a single particle impact damper", *Journal of Sound and Vibration*, Cilt 286, Sayı (1–2), ss. 123–44.
- Knight, B., Parsons, D., Smith, A., 2013, "Evaluating Attenuation of Vibration Response using Particle Impact Damping for a Range of Equipment Assemblies", *AIAA Aerospace Design and Structures Event; 8-11 Apr. 2013; Boston, MA; United States*, 1–9.
- Koch, S., Duvigneau, F., Orszulik, R., Gabbert, U., Woschke, E., 2017, "Partial filling of a honeycomb structure by granular materials for vibration and noise reduction", *Journal of Sound and Vibration*, Cilt 393, ss. 30–40.
- Lu, Z., Lu, X., Lu, W., Masri, S. F., 2012, "Experimental studies of the effects of buffered particle dampers attached to a multi-degree-of-freedom system under dynamic loads", *Journal of Sound and Vibration* Cilt 331, Sayı 9, ss. 2007–22.
- Lu, Z., Lu, X., Masri, S. F., 2010, "Studies of the performance of particle dampers under dynamic loads", *Journal of Sound and Vibration* Cilt 329, Sayı 26, ss. 5415–33.
- Mao, K., Yu Wang, M., Zhiwei, X., Chen, T., 2004, "Simulation and characterization of particle damping in transient vibrations", *Journal of Vibration and Acoustics, Transactions of the ASME*, Cilt 126, Sayı 2, ss. 202–11.
- Masri, S. F., 1970, "General Motion of Impact Dampers", *The Journal of the Acoustical Society of America*, Cilt 47, Sayı 1B, ss. 229–37.
- Masri, S. F., Gaughey, T. K., 1964, "On the stability of the impact damper", *Journal of Applied Mechanics, Transactions ASME*, Cilt 33, Sayı 3, ss. 586–92.
- Michon, G., Almajid, A., Aridon, G., 2013, "Soft hollow particle damping identification in honeycomb structures", *Journal of Sound and Vibration* Cilt 332 Sayı, 3 ss. 536–44.
- Moore, J. J., Palazzolo, A. B., Gadangi, R., Nale, T. A., Klusman, S. A., Brown, G. V., Kascak, A. F., 1995, "A forced response analysis and application of impact dampers to rotordynamic vibration suppression in a cryogenic environment", *Journal of Vibration and Acoustics, Transactions of the ASME* Cilt 117, Sayı 3, ss. 300–310.
- Panossian H., 2005, "Apparatus and method for aircraft cabin noise attenuation via non-obstructive particle damping", 1(19).
- Panossian, H., Ehrig, R., 2007, "Non-Obstructive Particle Damping (NOPD) treatment optimization for composite honeycomb panels", *Collection of Technical Papers - AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*. Cilt 4, ss. 4209–18
- Saeki, M., 2002, "Impact damping with granular materials in a horizontally vibrating system", *Journal of Sound and Vibration*, Cilt 251, Sayı 1, ss. 153–61.
- Saeki, M., 2005, "Analytical study of multi-particle damping", *Journal of Sound and Vibration*, Cilt 281, Sayı (3–5), s.1133–44.
- Tsuji, Y., Tanaka, T., Ishida, T., 1992, "Lagrangian numerical simulation of plug flow of cohesionless particles in a horizontal pipe", *Powder Technology*, Cilt 71, Sayı 3, ss.239–50.
- Vinayaravi, R., Kumaresan, D., Jayaraj, K., Asraff, A. K., Muthukumar, R., 2013, "Experimental investigation and theoretical modelling of an impact damper", *Journal of Sound and Vibration* Cilt 332, Sayı 5, ss. 1324–34.
- Wang, B., Yang, M., 2000, "Damping of honeycomb sandwich beams", *Journal of Materials Processing Technology*, Cilt 105, Sayı 1, ss. 67–72.
- Wong, C. X., Daniel, M. C., Rongong, J. A., 2009, "Energy dissipation prediction of particle dampers", *Journal of Sound and Vibration*, Cilt 319, Sayı (1–2), ss. 91–118.

- Xu, Z., Yu Wang, M., Chen, T., 2004, "An experimental study of particle damping for beams and plates", *Journal of Vibration and Acoustics, Transactions of the ASME*, Cilt 126, Sayı 1, ss. 141–48.
- Xu, Z., Yu Wang M., Chen, T., 2005, "Particle damping for passive vibration suppression: Numerical modelling and experimental investigation", *Journal of Sound and Vibration*, Cilt 279, Sayı (3–5), ss. 1097–1120.
- Yao, B., Chen, Q., 2015, "Investigation on zero-gravity behavior of particle dampers", *JVC/Journal of Vibration and Control*, Cilt 21, Sayı 1, ss. 124–33.