

**DINCON 2017**CONFERÊNCIA BRASILEIRA DE DINÂMICA, CONTROLE E APLICAÇÕES
30 de outubro a 01 de novembro de 2017 – São José do Rio Preto/SP

Otimização Multiobjetivo de Parâmetros de Suspensão Veicular com algoritmo QPSO

Ewerton Grotti¹Herbert Martins Gomes²

Grupo de Pesquisa em Risco, Identificação e Quantificação de Incertezas, GPRIQI, Dep. de Eng. Mecânica, PROMEC, UFRGS, Porto Alegre, RS

Marcos Daniel de Freitas Awruch³

Grupo de Pesquisa em Risco, Identificação e Quantificação de Incertezas, GPRIQI, Dep. de Eng. Mecânica, Curso de Eng. Aeroespacial, UFSM, Santa Maria, RS

Resumo. Este artigo descreve um estudo sobre minimização da vibração incidente nos passageiros e motorista de um ônibus. Um modelo de ônibus de 13 graus de liberdade foi usado para simular uma manobra de mudança dupla de faixa (DLC) onde incluiu-se a dinâmica lateral. A simulação foi acoplada ao algoritmo de otimização multiobjetivo NSGA-II e também a um novo algoritmo heurístico multiobjetivo proposto, baseado no modelo de enxame de partículas quânticas (QPSO). Três assentos representativos foram escolhidos de forma a examinar a aceleração vertical sobre os passageiros e sobre o motorista. Com base nas curvas de Pareto geradas, é possível identificar o comportamento das dez variáveis de projeto da suspensão veicular com relação à minimização da vibração e também verificar a eficiência do novo algoritmo proposto frente aos algoritmos tradicionais.

Palavras-chave. Otimização Multiobjetiva, QPSO, suspensão veicular, dinâmica lateral.

1 Introdução

A vibração de veículos depende principalmente da rugosidade da superfície da estrada, do sistema de suspensão do veículo e da velocidade do mesmo. Em relação à vibração, esta pode produzir uma sensação incômoda no corpo inteiro (vibração de baixa frequência), causar dor nas mãos ou pés (baixa e alta frequência) ou mesmo lesões em vértebras lombares dos passageiros e motorista. O objetivo principal da suspensão do veículo é alcançar boa estabilidade de condução e

¹ ewerton.grotti@hotmail.com

² herbert@emcanica.ufrgs.br

³ m.dfa@gmail.com

conforto dos passageiros, independentemente da superfície da estrada e do controle de vibração do veículo. A suspensão passiva ainda é o tipo mais comum usado nos veículos de hoje. Definir os parâmetros das molas e amortecedores deve, portanto, atender a demandas conflitantes: reduzir a transmissão de vibração para o veículo e os ocupantes e reduzir a vibração das rodas para garantir o contato permanente entre as rodas e a estrada. Vários autores investigaram a otimização dos parâmetros de suspensão nas últimas décadas. A principal ideia por trás dessa pesquisa é a minimização da vibração do veículo, principalmente nas posições do passageiro e do motorista, a fim de evitar o desconforto humano.

Spentzas e Kanarachos [5] desenvolveram uma metodologia para projetar um sistema de suspensão ativo híbrido, tendo o conforto do passageiro como função de custo (controle do nível de aceleração vertical do passageiro). Foi utilizada uma abordagem de inteligência computacional denominada Rede Neural Artificial para aprender a função de controle desconhecida. As comparações numéricas foram realizadas no domínio do tempo e o veículo foi modelado como um modelo de 2 graus de liberdade. Ahmadian *et al.* [1] criaram um sistema de suspensão ativo e implementado para suavizar a amplitude e aceleração recebidas pelo passageiro dentro dos limites de limiar de saúde humana. Um modelo de um quarto de carro foi considerado nas abordagens com três controles: o controle ótimo, Controle Fuzzy e Controle Fuzzy Ótimo Adaptativo. A aplicação mais próxima do QPSO na otimização da suspensão passiva do veículo foi apresentada por Lee e Cheng[3] onde a otimização com enxames de partículas quânticas (QPSO) resolveram o problema da avaliação da sensibilidade em um sistema de veículo ferroviário com catorze graus de liberdade com equações diferenciais acopladas não-lineares de movimento.

2 Propósito da investigação

O presente artigo tem o objetivo de apresentar um novo algoritmo metaheurístico de otimização multiobjetivo baseado no comportamento de partículas quânticas (QPSO) aplicado ao problema de vibrações de um sistema de ônibus. O modelo de veículo prevê comportamento de dinâmica vertical assim como lateral numa manobra padronizada de dupla troca de faixa de trajetória. A dinâmica lateral acoplada às equações diferenciais da dinâmica vertical é inédita e resolvida no tempo pelo método de Newmark não-linear. Como objetivo secundário pretende-se avaliar comparativamente os resultados obtidos com aqueles utilizando um algoritmo tradicional multiobjetivo bastante utilizado, o NSGA-II.

3 Materiais e Métodos

3.1 Modelo de dinâmica vertical e lateral acoplada

O modelo de ônibus é uma melhoria do ônibus IK-301 descrito em Sekulic *et al.* [4]. O ônibus tem um sistema de suspensão com eixos rígidos. O eixo dianteiro está preso ao corpo por meio de dois *airbags* e quatro amortecedores telescópicos e eixo traseiro presos por quatro *airbags* e quatro amortecedores telescópicos. A Figura 1 mostra o modelo espacial oscilatório do ônibus IK-301 com 13 graus de liberdade: deslocamentos verticais de quatro rodas, rotação dos eixos traseiro e dianteiro, deslocamentos dos eixos traseiro e dianteiro, arfagem, rolagem e deslocamento vertical da carroçaria do ônibus, Lateral, longitudinal e guinada do ônibus e os deslocamentos verticais de um motorista sentado e dois passageiros sentados. As equações que

descrevem a dinâmica vertical assim como dados referentes às variáveis podem ser encontradas na referência são as mesmas descritas em Sekulic *et al.*[4]. Para a dinâmica lateral, as novas equações de movimento empregadas são as seguintes:

Deslocamentos laterais:

$$m_{zm}\ddot{y} + (c_{a1} \cos \delta_1 + c_{a2} \cos \delta_2 + c_{a3} + c_{a4})\dot{y} + (m_{zm}v^2 + c_{a1}a \cos \delta_1 + c_{a2}a \cos \delta_2 - c_{a3}b - c_{a4}b)\dot{\psi} / v = c_{a1}\delta_1 \cos \delta_1 + c_{a2}\delta_2 \cos \delta_2 + c_{s1}S_{x1} \sin \delta_1 + c_{s2}S_{x2} \sin \delta_2 \quad (1)$$

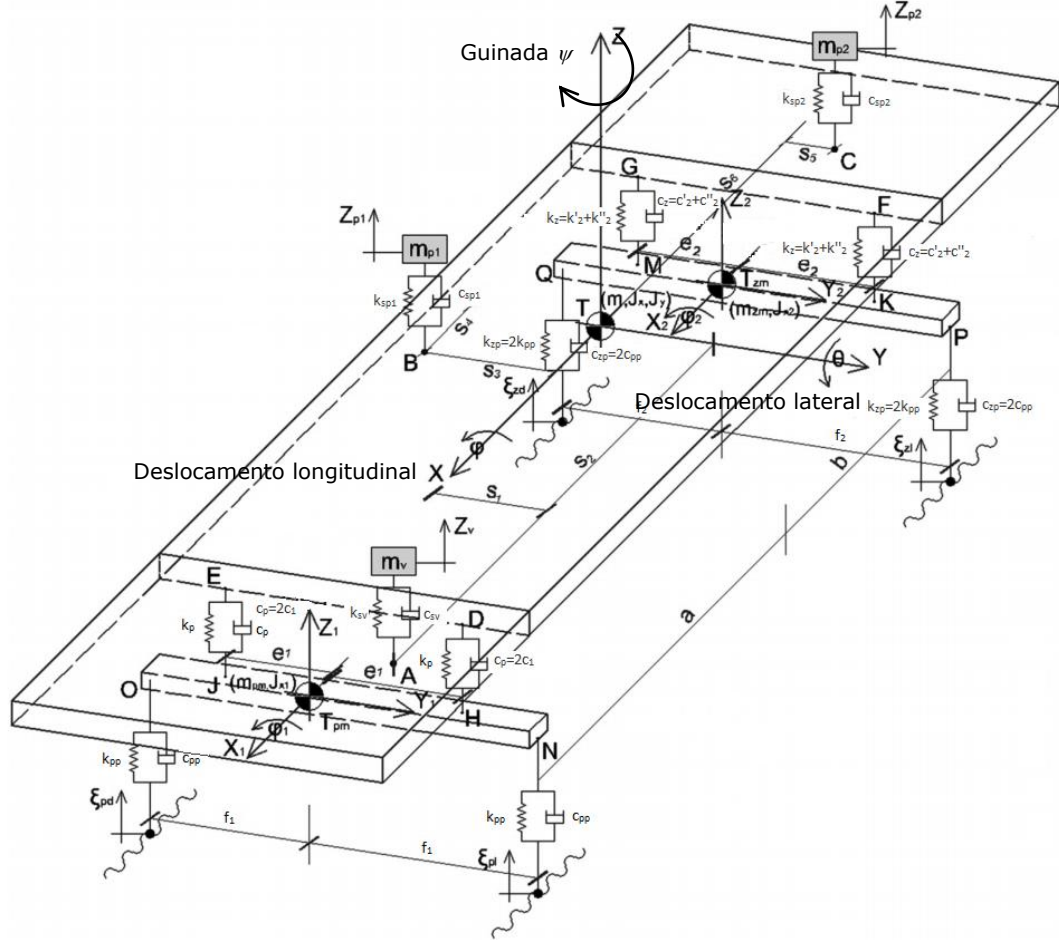


Figura 1: Modelo de suspensão de ônibus (adaptado de Sekulic *et al.*, 2013 [4])

Para a Guinada:

$$m_{zm}\ddot{\psi} + (c_{a1}f_1 \sin \delta_1 - c_{a2}f_1 \sin \delta_2 + c_{a1}a \cos \delta_1 + c_{a2}a \cos \delta_2 - c_{a4}b - c_{a3}b)\dot{y} / v + (c_{a1}af_1 \sin \delta_1 - c_{a2}af_1 \sin \delta_2 + c_{a1}a^2 \cos \delta_1 + c_{a2}a^2 \cos \delta_2 - c_{a4}b^2 - c_{a3}b^2)\dot{\psi} / v = f_2c_{s4}S_{x4} - f_2c_{s2}S_{x2} - f_1c_{a2}\delta_2 \sin \delta_2 + f_1c_{a2}\delta_1 \sin \delta_1 + f_1c_{a1}\delta_1 \sin \delta_1 + f_1S_{x2} \cos \delta_2 - f_1c_{s1} \cos \delta_1 + a c_{s1}S_{x1} \sin \delta_1 + a c_{s2}S_{x2} \sin \delta_2 + a c_{a1}\delta_1 \cos \delta_1 + a c_{a2}\delta_2 \cos \delta_2 \quad (2)$$

Para o deslocamento longitudinal:

$$m_{zm}\ddot{x} + (-c_{a1}\sin\delta_1 - c_{a2}\sin\delta_2 + c_{a3} + c_{a4})\dot{y}/v + (-c_{a2}a f_1\sin\delta_2 + c_{a1}a f_1\sin\delta_1 + c_{a1}a^2\cos\delta_1 + c_{a2}a^2\cos\delta_2 + c_{a3}b^2 + c_{a4}b^2)\dot{\psi}/v = c_{s2}S_{x2}\cos\delta_2 + c_{s1}S_{x1}\cos\delta_1 + c_{s3}S_{x3} + c_{s4}S_{x4} - c_{a1}\delta_1\sin\delta_1 - c_{a2}\delta_2\sin\delta_2 \quad (3)$$

Como excitação, os esterçamentos δ_i da rodas dianteiras são empregadas seguindo o caminho descrito para a manobra de dupla troca de faixa (ISO 3888-1:1999 [7]). Além disto, ondulações padronizadas de rodovias (classe C, veículo a 80km/h), descritas na ISO 8606:1995 Standard [8] são empregadas como excitações verticais em cada um dos pneus. O modelo prevê correlações entre trilhas laterais assim como pneus dianteiros e traseiros pertencentes a uma mesma trilha.

3.2 Otimização multiobjetivo baseada em QPSO

Otimização multiobjetiva é, do ponto de vista do *design* na engenharia, o alicerce para todas as decisões. Diferente da otimização simples, a otimização multiobjetivo apresenta múltiplas respostas, $f(\mathbf{x}_i) = (f_1(\mathbf{x}_i), f_2(\mathbf{x}_i), \dots, f_k(\mathbf{x}_i))^T$, para um conjunto de variáveis de projeto $\mathbf{x}_i = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$. O conceito de fronteira de Pareto (Vilfredo Pareto, 1848–1923) soluciona este problema, apresentando este conjunto de soluções ótimas que atendem aos objetivos conflitantes. Assim, define-se que um vetor solução $f(\mathbf{x}_A)$ domina um vetor $f(\mathbf{x}_B)$ se, e apenas se (no caso da minimização), $f_i(\mathbf{x}_A) \leq f_i(\mathbf{x}_B)$ para $i=1, \dots, k$ e para ao menos um índice, $f_j(\mathbf{x}_A) < f_j(\mathbf{x}_B)$ para $i=1, \dots, k$ sendo k o número de funções objetivo. Caso a regra acima não seja violada, ambos os vetores solução são ditos não-dominados um com respeito ao outro. O conjunto de todos os vetores-solução não-dominados de um problema, constituem a chamada fronteira de Pareto.

O QPSO (Sun *et al.*[6]) é uma importante variação do PSO motivada pela mecânica quântica e análise da trajetória de PSO, em que o estado de cada partícula pode ser descrita por uma função de onda $\Psi(x)$. A probabilidade de se encontrar a partícula em determinada posição pode ser descrita pela função densidade de probabilidade $Q(x) = (1/L)\exp(-2|p - x|/L)$. Dada a distribuição da função de probabilidade, utilizando o método de simulação estocástico de Monte Carlo, a posição da partícula pode ser obtida pela equação estocástica $x = p + (L/2)\ln(1/u)$ com $u \sim U(0,1)$, onde p é uma variável randômica. O parâmetro L caracteriza a criatividade ou imaginação da partícula, descrita por $L = 2\alpha|x - mbest|$, onde $mbest$ é a média da melhor posição de cada partícula do enxame de N_p indivíduos. A expressão de atualização da posição fica, portanto: $x_{i,n+1}^j = p_{i,n}^j \pm \alpha_n |mbest_n^j - x_{i,n}^j| \ln(1/u_{i,n+1}^j)$, $u \sim U(0,1)$ onde α_n é o coeficiente na iteração n , decrescendo linearmente de um valor inicial $\alpha_{inicial}$, atingindo um valor final α_{final} ao completar todas as iterações n_{iter} .

O algoritmo aqui proposto (MOQPSO, *Multi Objective Quantum Particle Swarm Optimization*) emprega as definições de não dominância juntamente com os critérios de movimentação das partículas definidas pelo QPSO. A lista de partículas não dominadas em cada iteração (geração) é guardada e ao final um teste de dominância é feito com todas as partículas da fronteira, restando aquelas que são mutuamente não dominadas. Uma técnica de manutenção de partículas extremas é aplicada afim de manter as fronteiras as mais detalhadas possíveis. Um critério de proximidade no espaço das funções objetivo também é empregado com o objetivo de evitar a aglomeração das partículas em regiões ou movimentos desnecessários em regiões do espaço das funções objetivo já povoadas. O novo algoritmo foi testado em 8 funções de benchmark e comparado com resultados da bibliografia (Deb, *et al.*[2]) usando os parâmetros da mesma. Os resultados aprovaram o algoritmo como competitivo, sendo superior aos algoritmos NSGAI, SPEA e PAES em 3 das 8 funções.

3.3 A otimização multiobjetivo sob manobra DLC

Utilizando o algoritmo NSGA-II e o aqui proposto MOQPSO, foi realizada a otimização multiobjetiva no sistema de suspensão veicular do ônibus. As variáveis de projeto assumidas foram as rigidezes e amortecimentos da suspensão do veículo (10 variáveis). As funções multiobjetivo escolhidas foram a três acelerações verticais *rms* resultantes no motorista, e nos dois passageiros, posicionados um ao fundo à esquerda, e outro à direita, próximo do centro de gravidade do veículo, vide Sekulic *et al.* [4].

$$\begin{aligned} \text{Minimize} \quad & f_i(x) = az_{rms,i}, \quad i = 1,2,3 \\ \text{Tal que} \quad & x \in [0,75 \cdot x_{ref}; 1,25 \cdot x_{ref}] \end{aligned} \quad (4)$$

onde x_{ref} é o vetor das variáveis de projeto com valores nominais.

4 Resultados e Discussões

Os testes usando o algoritmo NSGAII implementado nativamente no software Matlab [9] produziram uma fronteira de Pareto insuficiente, mesmo após estudo exaustivo sobre os parâmetros de entrada. Uma nova versão do NSGAII com melhorias foi utilizada, a qual gerou uma fronteira de Pareto mais extensa, distribuída e avançada. Para comparação, o novo algoritmo MOQPSO e o NSGAII foram configurados para trabalhar com o mesmo número de chamadas da função objetiva. Um teste de dominância foi realizado e mostrou que todas as 800 partículas encontradas pelo NSGAII foram dominadas, contra nenhuma dominada obtida pelo MOQPSO. A Figura 2 mostra a comparação entre as fronteiras dos dois algoritmos.

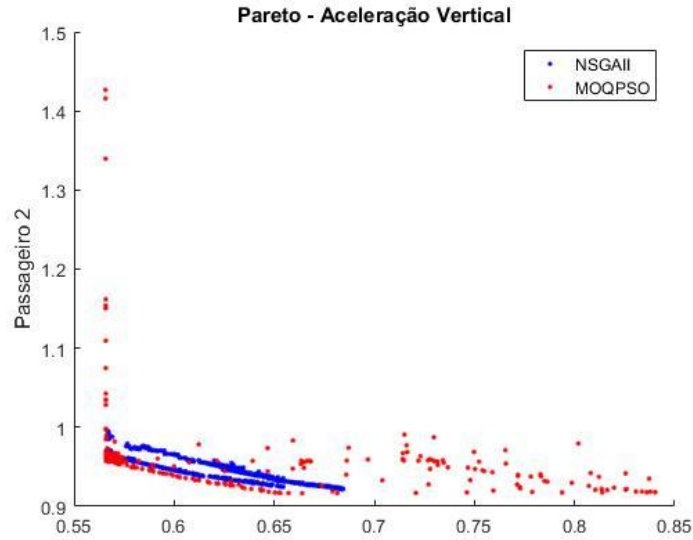


Figura 2: Comparação entre os algoritmos após 135 324 chamadas da função objetivo.

Analisando a Figura 2, nota-se que o QPSO obteve uma fronteira mais avançada e mais abrangente, a qual permite visualizar melhor o problema. Observando apenas a fronteira gerada pelo NSGAII não seria possível identificar pontos mais afastados, talvez essenciais

para um eventual problema. Para um estudo mais profundo, um novo teste apenas com o MPQPSO foi realizado, desta vez com um número maior de chamadas da função objetivo. O resultado pode ser visto na Figura 3.

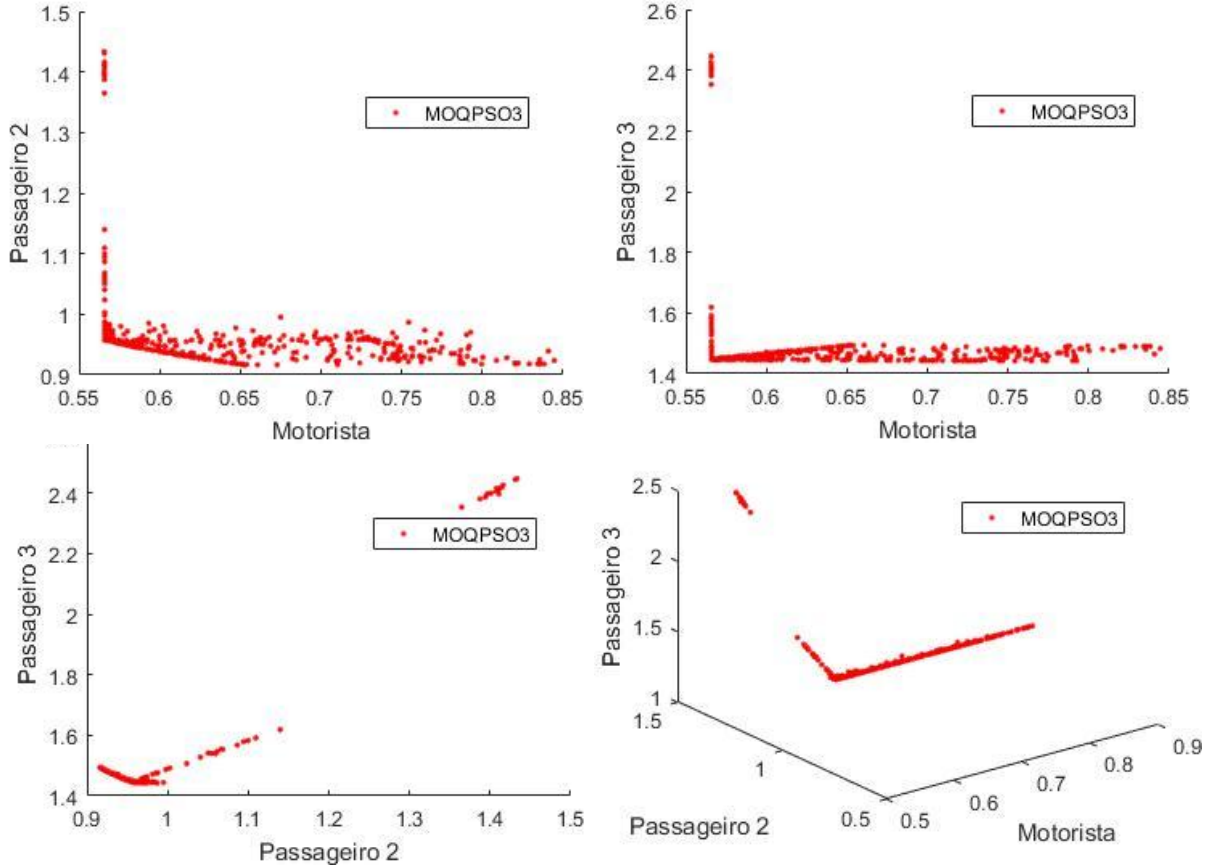


Figura 3: Fronteira de Pareto tridimensional da aceleração vertical para 291 932 chamadas da função objetivo.

Analisando a Figura 3 é possível notar que a vibração no motorista é a que possui maior variação. As vibrações nos passageiros 2 e 3 variam pouco para quase todos os pontos encontrados, com exceção para os pontos dispersos nas extremidades: os quais oferecem uma pequena redução na vibração do motorista ao custo de um grande aumento na vibração dos passageiros 2 e 3. Um ponto sugerido para escolha, em um eventual projeto, seria o ponto com as seguintes características: 7.5k(N/m) para a rigidez da mola do sistema de suspensão do motorista, 30(kN/m) para a rigidez dos assentos dos passageiros 2 e 3, 131250 (N/m) para rigidez do *airbag* do eixo frontal, 306490(N/m) para a rigidez equivalente do *airbag* esquerdo e direito do eixo traseiro, 783,73(Ns/m) para o amortecedor absorvedor de impacto do sistema de suspensão do motorista, 275(Ns/m) para o amortecimento dos assentos dos passageiros 2 e 3, 30(kNs/m) para o amortecedor absorvedor de impacto esquerdo e direito do eixo frontal e 34480(Ns/m) para o traseiro.

A fronteira de Pareto encontrada representa todas as soluções ideais de vibração, as quais remetem às variáveis de projeto. A fronteira deve auxiliar o projetista na hora da escolha destas variáveis, o qual deve comparar as soluções ideais com o custo e disponibilidade das peças no mercado.

É importante ressaltar que um dos critérios usados na avaliação de um algoritmo multiobjetivo é o espalhamento regular de sua solução. É possível forçar um algoritmo para esta situação usando algumas ferramentas, porém, com perdas no alcance da fronteira. Do ponto de vista da aplicação, o fator da regularidade não é tão importante desde que a fronteira seja suficientemente povoada, como no caso do MOQPSO. Foi apontado anteriormente que as partículas mais afastadas não foram encontradas pela fronteira do NSGAI, o que representa um problema em situações onde estes limites sejam desejados.

Agradecimentos

Os autores agradecem o suporte do CNPq e CAPES assim como do Grupo de Pesquisa GPRIQI do Dep. de Eng. Mecânica.

Referências

- [1] M. T. Ahmadian, S. R. Sharifi, and R. Abdollahpour, Application of car active suspension in a vertical acceleration reduction of vehicle due to road excitation and its effect on human health. vol. 6: 5th Int. Conf. on Multibody Systems, Nonlinear Dynamics, and Control, California, USA, 375-382; (2005).
- [2] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, and T. Meyarivan, A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, vol.6 (2), (2002). DOI: 10.1109/4235.996017.
- [3] C. K. Lee, and Y. C. Cheng, Application of uniform design and QPSO in the sensitivity problem a railway vehicle system. Procedia Engineering, vol.79, 427-436, (2014). DOI: 10.1016/j.proeng.2014.06.364.
- [4] D. Sekulic, V. Dedovic, S. Rusov, and S. Salinic, A. Obradovic, Analysis of vibration effects on the comfort of intercity bus users by oscillatory model with ten degrees of freedom. Elsevier, (2013). DOI: 10.1016/j.apm.2013.03.060.
- [5] K. Spentzas, S. A. Kanarachos, Design of a non-linear hybrid car suspension system using neural networks. Mathematics and Computers in Simulation, (2002). DOI: 10.1016/S0378-4754(02)00029-0.
- [6] J. Sun, C.-H. Lai, and X.-J. Wu, Particle Swarm Optimisation - Classical and Quantum Perspectives, CRC Press, EUA, (2012). ISBN 9781439835760.
- [7] ISO 3888-1, 1999. Passenger cars-track for a severe lane-change manoeuvre: Part 1: Double lane change. International Organization for Standardization (ISO), (1999).
- [8] ISO 8606, 1995. Mechanical Vibration: Road Surface Profile: Reporting measured data, International Organization for Standardization (ISO), (1995).
- [9] MATLAB, MATrix LABoratory, R2012a. The MathWorks Inc., Natick, MA, (2000).